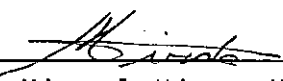


ESTUDO EXPERIMENTAL DE UMA FAMÍLIA DE ROTORES TIPO HÉLICE

Ivo Rischbieter

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA MECÂNICA

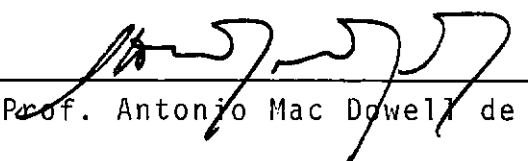
Aprovada por:



Prof. Miguel Hiroo Hirata
(Presidente)



Prof. Alcir de Faro Orlando



Prof. Antonio Mac Dowell de Figueiredo



Prof. Jan Leon Scieszko

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 1985

RISCHBIETER, IVO

Estudo Experimental de uma Família de Rotores Tipo Hélice (Rio de Janeiro) 1985

XVII, 225 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Mecânica, 1985)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE

1. Energia Eólica

I. COPPE/UFRJ II. Título (Série)

A meus pais e
irmãos.

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UMA FAMÍLIA DE ROTORES TIPO HÉLICE

Ivo Rischbieter

Março de 1985

ORIENTADOR: Miguel Hiroo Hirata

PROGRAMA: Engenharia Mecânica

Com o estudo experimental são obtidas as curvas adimensionais de $C_p \times RV$, $C_T \times RV$ e $C_E \times RV$ para vinte rotores tipo hélice de três pás sem torção, corda constante e o mesmo perfil GÖ 624 ao longo do seu comprimento.

Os modelos reduzidos tem um diâmetro de 0,45 m e foram testados em um túnel de vento com seção transversal de 1 m x 1 m e velocidade máxima em torno de 9,0 m/s.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL FULFILL-
MENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(M. Sc.)

AN EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PROPELLER WIND ROTOR FAMILY

Ivo Rischbieter

March 1985

CHAIRMAN : Miguel Hiroo Hirata

DEPARTMENT: Mechanical Engineering

The Power Coefficient, Torque Coefficient and Thrust Coefficient was derived from the data collected using 20 models of 3 blades propeller wind rotors tested in a wind tunnel.

The rotor analysed had untwisted blades of constant chord and the same profile - Gö 624. The models used had a 0,45m diameter and the square test section of the wind tunnel an area of 1 m². The maximum wind speed was around 9,0 m/s.

AGRADECIMENTOS

Para que qualquer trabalho de tese alcance os objetivos desejados é fundamental a colaboração de um grupo de pessoas e, dentre as muitas que tiveram uma participação gostaria de agradecer em especial às seguintes:

ao Orientador e Prof. Miguel Hiroo Hirata pelo seu total apoio e entusiasmo;

aos técnicos Carlos Humberto Lionel de Souza e José Carlos Stockler;

aos estagiários Fernando, Flávio e Tadeu;

ao Prof. Edson H. Watanabe e o Engº. Paulo George Guimarães pelo total apoio na parte eletrônica;

aos colegas do vento Engº. Miguel Dadbab Calache (in memoriam), Prof. Júlio Cesar Passos e Engº. Sérgio Kafuri;

aos companheiros de moradia, em especial ao Engº. Antonio dos Santos Maciel Neto e o Engº. Ronaldo Alves Barbosa;

à FATMA - Fundação de Amparo e Tecnologia ao Meio Ambiente, na pessoa do Superintendente Geral Dr. José Márcio Marques Vieira, do Superintendente Técnico Dr. Mário Carvalho e Silva Garcia, ao Chefe da Unidade de Tecnologia Engº. José Comin e à Eng^a. Elisabeth Amim Vieceli.

aos meus irmãos Carlos e Marcos;

ao aluno de Doutorado Adyles Arato Junior;

ã Daisy pela excelente datilografia.

NOMENCLATURA ADOTADA

N	: número de pás do rotor
C	: corda do perfil aerodinâmico
L	: comprimento da pá
A_v	: área varrida pelo rotor
A_T	: área transversal da seção de testes do túnel de vento II
R	: raio do rotor eólico
R_o	: raio do bosso
r	: raio de uma seção genérica da pá
I	: momento de inércia
D	: diâmetro do rotor
D_o	: diâmetro do bosso
C_D	: coeficiente de arrasto
C_L	: coeficiente de sustentação
F_D	: força de arrasto
F_L	: força de sustentação
V_M	: velocidade de vento medida no túnel de vento II
V	: velocidade de vento na região do rotor
W	: velocidade relativa do vento
v_i	: velocidade induzida
W_∞	: velocidade relativa do vento não perturbada
w	: velocidade angular do rotor
\dot{w}	: aceleração angular do rotor
RV	: razão de velocidade
H	: passo de uma seção genérica da pá
C_p	: coeficiente de potência
C_T	: coeficiente de torque
C_E	: coeficiente de empuxo

σ	: solidez do rotor
ν	: viscosidade cinemática
ρ	: massa específica do ar
ρ'	: massa específica do fluido manométrico
T_R	: torque resistivo nos mancais
α	: ângulo de ataque
θ	: ângulo de uma seção com o plano de rotação
β	: ângulo de caimento
ϵ	: fator de bloqueio
P	: potência
T	: torque
E	: empuxo

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</u>	1
 <u>CAPÍTULO II - DEFINIÇÕES BÁSICAS</u>	4
II.1 - Aspectos Geométricos do Rotor Eólico e Perfil Aerodinâmico.....	4
II.1.1 - Diâmetro do Rotor Eólico, Bosso e Comprimento da Pã.....	4
II.1.2 - Corda do Perfil Aerodinâmico.....	5
II.1.3 - Passo e Ângulo de uma Seção (r) da Pã.....	5
II.1.4 - Ângulo de Caimento.....	9
II.1.5 - Solidez do Rotor Eólico.....	10
II.2 - Aspectos Cinemáticos e Dinâmicos.....	10
II.2.1 - Forças de Sustentação e Arrasto Sobre um Aerofólio.....	10
II.2.2 - Diagrama de Velocidades e Forças Aerodinâmicas em uma Seção (r) do Rotor Eólico.....	12
II.2.3 - Origem das Forças de Sustentação e Arrasto.....	12
II.2.4 - Análise Dimensional do Escoamento sobre um Aerofólio.....	17
II.2.5 - Definição dos Coeficientes de Sustentação e Arrasto.....	18
II.2.6 - Regimes de Escoamento em Torno de um Aerofólio.....	18
II.3 - Coeficientes de Análise do Desempenho de um Rotor Eólico.....	19

II.4 - Análise da Curva Torque x Velocidade Angular.....	20
II.5 - Definição da Família de Rotores Eólicos.....	22
II.5.1 - Distribuição da Corda do Perfil ao Longo da Pã.	23
II.5.2 - Ângulo de Cada Seção em Relação ao Plano de Rotação.....	23
II.5.3 - Perfil Aerodinâmico.....	24
II.5.4 - Características do Perfil Göttingen 624.....	27
II.5.5 - Cálculo do Momento de Inércia e Peso das Pãs...	30
II.5.6 - Números de Reynolds para os Modelos Reduzidos.	32
II.5.7 - Número dos Rotores Eólicos da Família.....	33
<u>CAPÍTULO III - EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL.....</u>	35
III.1 - Túnel de Vento II.....	35
III.1.1 - Dimensão dos Modelos Reduzidos.....	35
III.2 - Torquímetro LMF-A2.....	36
III.2.1 - Descrição da Concepção Básica.....	39
III.2.1.1 - Dimensões Principais do Conjunto.....	39
III.2.1.2 - Fixação do Conjunto no Túnel de Vento.....	39
III.2.1.3 - Sistema de Pãs.....	40
III.2.1.4 - Sistema de Mancais.....	40
III.2.1.5 - Sistema de Medição de Torque.....	41
III.2.1.6 - Sistema de Medição de Empuxo.....	42
III.2.1.7 - Sistema de Medição da Rotação.....	43
III.2.1.8 - Detalhes Gerais.....	43
III.2.2 - Descrição Detalhada do Sistema de Medição de Torque.....	44

III.2.2.1 - Princípio de Funcionamento.....	44
III.2.2.2 - Esquema Elétrico e Tratamento do Sinal.....	45
III.2.2.3 - Operação do Sistema de Torque.....	46
III.2.2.4 - Leitura e Registro do Sinal do Amplificador Dinâmico.....	46
III.2.2.5 - Faixas de Operação.....	47
III.2.3 - Descrição Detalhada do Sistema de Medida do Empuxo.....	48
III.2.3.1 - Princípio de Funcionamento.....	48
III.2.3.2 - Esquema Elétrico e Tratamento do Sinal.....	48
III.2.3.3 - Operação do Sistema de Empuxo.....	50
III.2.3.4 - Leitura e Registro do Sinal do Amplificador de Tensão.....	50
III.2.3.5 - Faixas de Operação.....	51
III.2.4 - Descrição Detalhada do Sistema de Medida de <u>Ro</u> <u>tação</u>	51
III.2.4.1 - Princípio de Funcionamento.....	51
III.2.4.2 - Esquema Elétrico e Tratamento do Sinal.....	52
III.2.4.3 - Operação do Sistema de Rotação.....	53
III.2.4.4 - Leitura e Registro do Sinal.....	53
III.2.4.5 - Faixas de Operação.....	54
III.2.5 - Calibração do Torquímetro e Levantamento de Perdas Mecânicas.....	54
III.2.5.1 - Tratamento dos Dados das Calibrações.....	54
III.2.5.2 - Sistema de Empuxo.....	57
III.2.5.3 - Sistema de Torque.....	61
III.2.5.4 - Sistema de Rotação.....	62

III.2.5.5 - Perdas Mecânicas nos Mancais.....	63
III.2.6 - Determinação das Incertezas.....	66
III.2.6.1 - Sistema de Torque e Rotação.....	67
III.2.6.2 - Sistema de Empuxo.....	71
III.2.6.3 - Perdas Mecânicas.....	73
III.2.7 - Equipamentos Periféricos.....	75
III.3 - Pás do Modelo Reduzido.....	81
III.3.1 - Concepção Estrutural e Material Utilizado.....	81
III.3.2 - Execução das Pás.....	81
 <u>CAPÍTULO IV - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</u>	 84
IV.1 - Preparação do Conjunto Experimental.....	84
IV.1.1 - Túnel de Vento II.....	84
IV.1.2 - Medição da Velocidade do Vento.....	85
IV.1.3 - Montagem do Conjunto de Pás.....	85
IV.1.4 - Conexão dos Conversores, Registrador Gráfico e Instrumentos Periféricos.....	85
IV.2 - Levantamento dos Dados Experimentais.....	85
IV.2.1 - Velocidade do Vento na Seção de Testes.....	86
IV.2.2 - Medidas de Torque, Rotação e Empuxo.....	87
IV.2.2.1 - Medidas de Torque, Empuxo e Rotação para o La do Esquerdo da Curva de $T \times w$	87
IV.2.2.2 - Medidas de Torque, Empuxo e Rotação para o La do Direito da Curva de $T \times w$	88

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO V - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</u>	90
V.1 - Tipo de Dados Experimentais.....	90
V.2 - Dados Diretos.....	90
V.2.1 - Velocidade do Vento.....	90
V.2.2 - Rotação e Torque.....	91
V.2.3 - Empuxo.....	91
V.2.4 - Cálculo dos Coeficientes Adimensionais.....	92
V.2.4.1 - Determinação da Incerteza no Valor da Potência	92
V.2.4.2 - Determinação da Incerteza no Valor da Razão de Velocidade.....	93
V.2.4.3 - Determinação da Incerteza no Valor do Coefi- ciente de Potência, Torque e Empuxo.....	93
V.2.5 - Ajuste de Curvas aos Dados Experimentais.....	96
V.3 - Dados Indiretos.....	96
V.4 - Dados Experimentais.....	98
V.4.1 - Exemplo do Registro de Dados.....	98
V.4.2 - Dados de Coeficiente de Potência x Razão de Velo- cidade.....	99
V.4.3 - Dados de Coeficiente de Torque x Razão de Veloci- dade.....	99
V.4.4 - Dados de Coeficiente de Empuxo x Razão de Veloci- dade.....	99
V.5 - Curvas Ajustadas.....	99
V.6 - Incerteza nos Valores dos Coeficientes de Potên- cia, Torque e Empuxo.....	100

	<u>Pág.</u>
V.7 - Discussão dos Resultados.....	103
V.7.1 - Eficiência dos Rotores Eólicos.....	103
V.7.2 - Solidez e Número de Reynolds.....	104
V.7.3 - Equipamento Experimental.....	105
<u>CAPÍTULO VI - CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....</u>	106
VI.1 - Conclusão.....	106
VI.2 - Sugestões.....	106
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	109
<u>APÊNDICE I - CÁLCULO DO RAIO EQUIVALENTE PARA SEÇÃO DO</u> <u>PERFIL GÖ 624.....</u>	112
A.I.1 - Definição das Áreas de Cálculo.....	112
A.I.2 - Tabela com o Valor das Áreas A_n	113
A.I.3 - Cálculo do Raio Equivalente em Função da Corda..	113
A.I.4 - Cálculo do Raio Equivalente em Função da Solidez, Número de Pás e Diâmetro do Rotor Eólico.....	114
<u>APÊNDICE II - CÁLCULO DOS FATORES DE CORREÇÃO DA VELOCI-</u> <u>DADE DO VENTO.....</u>	115
A.II.1 - Fatores de Bloqueio.....	115
A.II.2 - Determinação dos Fatores de Bloqueio.....	115
A.II.2.1 - Determinação do ε_{be}	116

	<u>Pág.</u>
A.II.2.2 - Determinação do ϵ_{bs}	116
<u>APÊNDICE III - CÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTO</u>	120
A.III.1 - Cálculo da Velocidade do Vento.....	120
A.III.2 - Determinação da Incerteza no Valor da Velocidade do Vento.....	122
<u>APÊNDICE IV - FOTOGRAFIAS E DESENHOS</u>	126
A.IV.1 - Fotografias.....	126
A.IV.2 - Desenho de Conjunto do Torquímetro LMF-A2.....	130
<u>APÊNDICE V - DADOS DE CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIDAS</u>	132
A.V.1 - Sistema de Medição de Empuxo.....	132
A.V.2 - Sistema de Medição de Torque.....	138
A.V.3 - Sistema de Medição da Rotação.....	141
A.V.4 - Levantamento de Perdas Mecânicas.....	143
<u>APÊNDICE VI - POLINÔMIOS DE AJUSTE E CURVAS DA FAMÍLIA A.</u>	147
A.VI.1 - Dados e Coeficientes dos Polinômios de Ajuste da Curva C_p x RV.....	147
A.VI.2 - Dados e Coeficientes dos Polinômios de Ajuste da Curva C_T x RV.....	169

A.VI.3 - Dados e Coeficientes dos Polinômios de Ajuste da Curva C_E x RV.....	191
A.VI.4 - Curvas de C_p x RV, C_T x RV e C_E x RV da Família A.....	213

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A escolha das características geométricas de um rotor eólico que, em dadas condições de vento, satisfaça requisitos especificados (ditados pela carga-gerador elétrico, bomba d'água, etc.) normalmente é efetuada utilizando-se algoritmos numéricos implantados em computadores ou utilizando-se de testes com modelos reduzidos realizados em túnel de vento.

A utilização das duas metodologias para a determinação das características aerodinâmicas de um rotor eólico apresenta as seguintes vantagens e limitações:

TIPO ABORDAGEM - INFORMAÇÕES	TEÓRICA	EXPERIMENTAL EM TUNEL DE VENTO
Tipo de análise	- Globais e locais	- Globais
Otimização	- Possível	- Onerosa
Infra-estrutura	- Computador	- Experimental
Problemas	- Curvas do perfil aerodinâmico - Fatores de correção	- Tecnologia e equipamento experimental - Custo de implantação - Tempo implantação
Dados gerados	- Amplos	- Restritos a rotores com semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica

Observa-se que em ambos os casos a necessidade de uma infra-estrutura onerosa limita bastante ou até torna inviável uma escolha racional das características geométricas nas situações mais comuns ^[1].

Modelos matemáticos com requintes variáveis de sofisticação, exigem o conhecimento prévio das características aerodinâmicas dos perfis utilizados em cada seção da pá do rotor e permitem a análise localizada de cada elemento ao longo da mesma, o que se constitui em uma potencialidade para a otimização do desempenho do rotor eólico. No entanto, neste tipo de abordagem é importante conhecer as limitações do modelo matemático utilizado bem como a limitação imposta pelo número reduzido de dados sobre perfis.

A utilização de testes com modelos reduzidos deve fornecer subsídios mais confiáveis, não permitindo porém uma análise do comportamento aerodinâmico de cada seção da pá.

Tendo em vista estes fatos estabeleceu-se o conceito de família de rotores eólicos que permite, dentro de certas limitações, a escolha das características geométricas adequadas do rotor para determinado tipo de carga, sem a necessidade do uso extensivo de computadores ou testes com modelos reduzidos, ferramentas que já foram utilizadas uma única vez na geração das características aerodinâmicas da família considerada. Uma família é constituída de elementos derivados, pela variação sistemática das características geométricas, de um rotor padrão. Entende-se por rotor padrão aquele em que são fixas as seguintes variáveis:

- número de pás
- distribuição do passo ao longo da pá
- distribuição da corda ao longo da pá
- distribuição do perfil aerodinâmico ao longo da pá
- relação diâmetro bossa/diâmetro rotor eólico
- rotor up-wind/down-wind
- ângulo de conicidade no caso do down-wind

O desempenho dos rotores eólicos de uma determinada família é representado por curvas de coeficiente de torque, potência, empuxo x razão de velocidade que podem ser estabelecidos utilizando-se modelos matemáticos e/ou modelos físicos reduzidos testados no túnel de vento.

Para a família em estudo as curvas foram estabelecidas experimentalmente. Na escolha do rotor padrão, do qual derivam todos os outros elementos, foram observadas algumas condições que conduzissem a rotores de geometria simples, apesar deste compromisso ter levado a uma redução na eficiência aerodinâmica.

No levantamento dos dados experimentais, foi um objetivo constante a geração dos mesmos o mais preciso possível e em especial a determinação das equações que descrevem o valor da incerteza nos valores finais.

CAPÍTULO II

DEFINIÇÕES BÁSICAS

Para a análise do desempenho aerodinâmico de um rotor eólico de eixo horizontal é necessária a definição e análise de alguns aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos descritos a seguir.

II.1 - ASPECTOS GEOMÉTRICOS DO ROTOR EÓLICO E PERFIL AERODINÂMICO

II.1.1 - Diâmetro do Rotor Eólico, Bosso e Comprimento da Pá

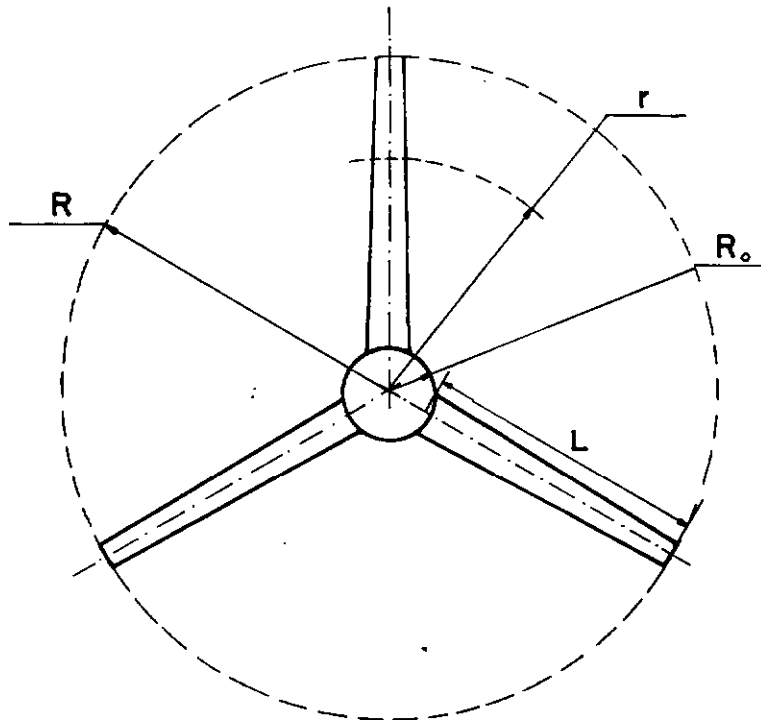


Fig. II.1

r = raio genérico

R_0 = raio do bosso

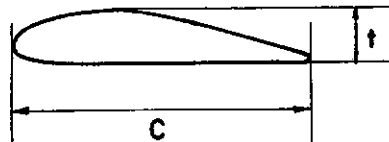
R = raio do rotor eólico

$D_0 = 2R_0$ = diâmetro do bosso

$D = 2R$ = diâmetro do rotor eólico

$L = R - R_0$ = comprimento da pã

II.1.2 - Corda do Perfil Aerodinâmico [7] (Figura II.2).



C = corda

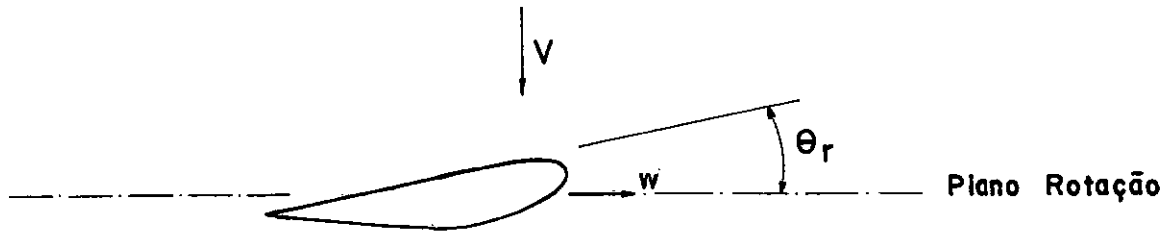
t = espessura
máxima

Fig. II.2 - Corda perfil aerodinâmico

II.1.3 - Passo e Ângulo de uma Seção (r) da Pã (Figuras II.3 e II.4).

Se a seção representada na Figura II.3 girar 360° percorrendo a trajetória retificada descrita na Figura II.4 é possível se definir o passo para esta seção genérica como sendo $H(r)$, onde:

$$H(r) = 2\pi r \cdot \text{tg}\theta_r$$



V = Velocidade do vento

w = Velocidade angular do rotor eólico

Fig. II.3 - Ângulo de uma seção da pá

A trajetória representada na Figura II.4 é definida pelo ângulo θ_r de cada seção com o plano de rotação e pelo comprimento $2\pi r$ equivalente a uma rotação de 360° .

A determinação do passo das seções representadas na Figura II.4 é definida pelas seguintes equações:

- Bosso (R_0)

$$H(R_0) = 2\pi R_0 \cdot \text{tg}\theta_0$$

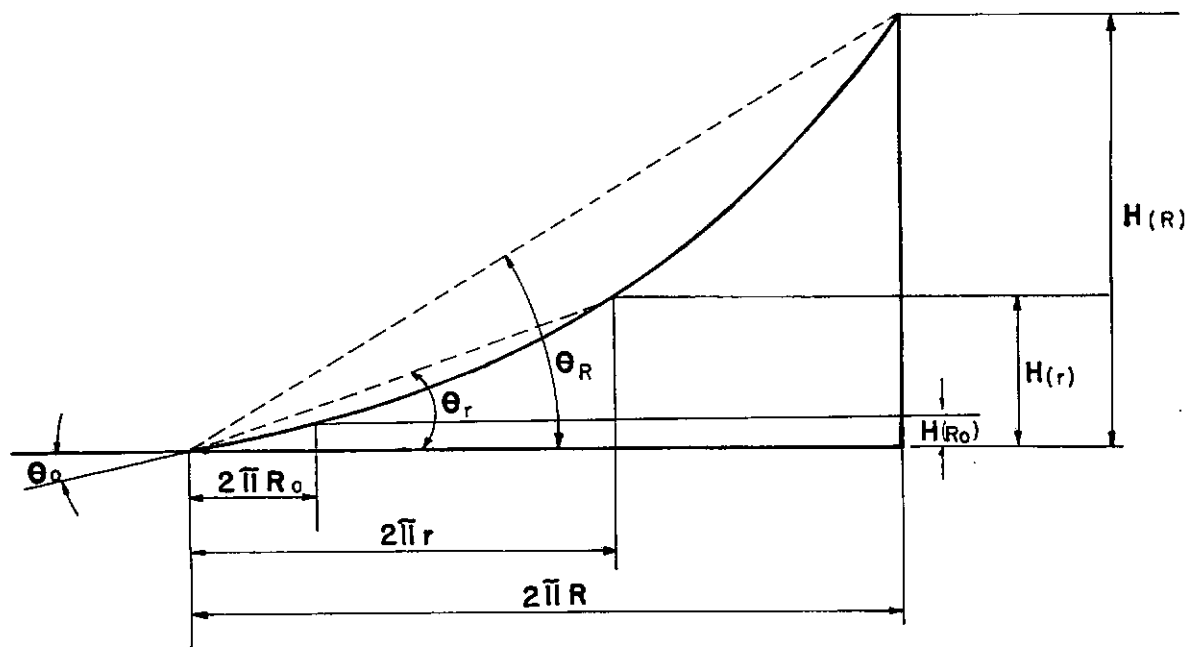


Fig. II.4 - Representação do passo

- Seção genérica (r)

$$H(r) = 2\pi r \cdot \operatorname{tg}\theta_r$$

- Seção da ponta da pá (R)

$$H(R) = 2\pi R \cdot \operatorname{tg}\theta_R$$

A adimensionalização do passo de cada seção genérica da pá é feita dividindo-se o passo $H(r)$ pelo raio R do rotor e o li-

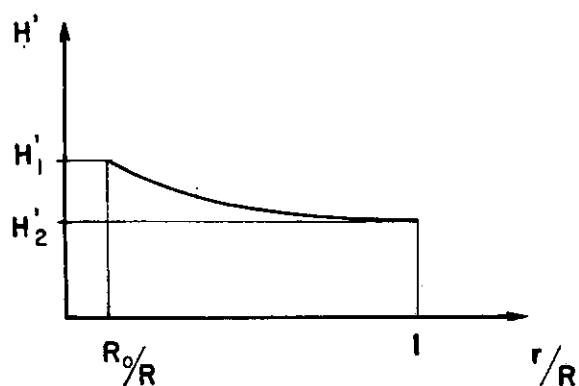
co.

$$H'(r/R) = H(r)/R$$

A partir da relação acima tem-se:

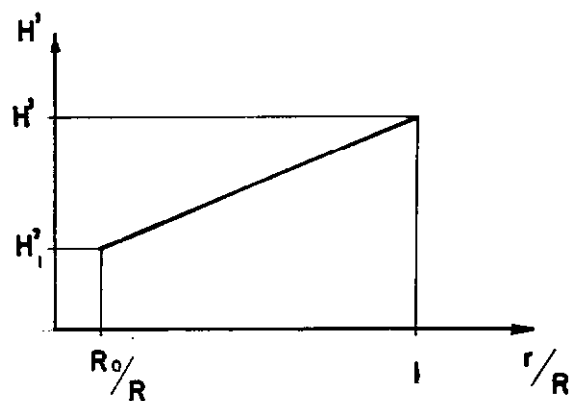
$$H'(r/R) = 2\pi \cdot \frac{r}{R} \operatorname{tg} \theta_r$$

Com a relação H' definida é possível a determinação do ângulo de cada seção com o plano de rotação para rotores helicoidais com diversos diâmetros. A relação H' pode ser descrita por uma função e para rotores de pás com e sem torção a mesma está representada nas Figuras II.5 e II.6.



$$\begin{aligned}\theta_r &= f(r) \\ c &= 2\pi \\ H'_1 &= c \cdot \frac{R_0}{R} \operatorname{tg} \theta_r \\ H'_2 &= c \cdot \operatorname{tg} \theta_R\end{aligned}$$

Fig. II.5 - Pá com torção



$$\theta_r = c \frac{r}{R}$$

$$C = 2\pi \cdot \tan \theta$$

$$H'_1 = C \cdot \frac{R_0}{R}$$

$$H'_2 = C$$

Fig. II.6 - Pã sem torção

II.1.4 - Ângulo de Caimento (Conicidade) (Figura II.7).

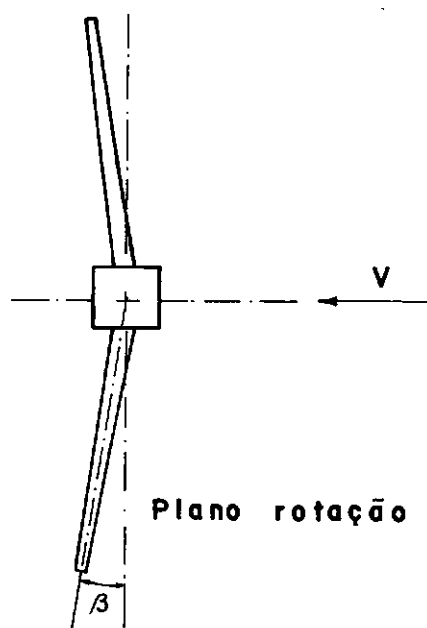


Fig. II.7 - Ângulo de caimento

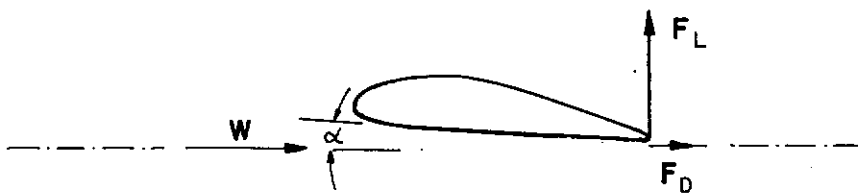
II.1.5 - Solidez do Rotor Eólico

A solidez $\tilde{\sigma}$ é definida pela razão entre a área das pás e a área varrida ou frontal do rotor eólico

$$\sigma = \frac{N.C(r).L}{A_v} = \frac{N.C(r).L}{\pi.R^2}$$

II.2 - ASPECTOS CINEMÁTICOS E DINÂMICOS

II.2.1 - Forças de Sustentação e Arrasto sobre um Aerofólio ^{|2|} (Figura II.8)



α = ângulo de ataque

W = velocidade relativa do vento

F_L = força de sustentação

F_D = força de arrasto

Fig. II.8 - Forças aerodinâmicas

Quando uma asa apresenta comprimento finito, os aspectos de ponta irão variar condições que irão afetar os valores das forças de sustentação e arrasto.

Em virtude da diferença de pressão entre a região de alta e baixa pressão do aerofólio haverá um escoamento em torno das pontas gerando os vórtices de ponta. Estes vórtices de ponta geram uma circulação que induz um fluxo no sentido vertical. Como resultado deste escoamento temos uma modificação do ângulo de ataque efetivo, valor da velocidade relativa e consequentemente das forças de sustentação e arrasto ^[3], ^[4], ^[5] (Figura II.9).

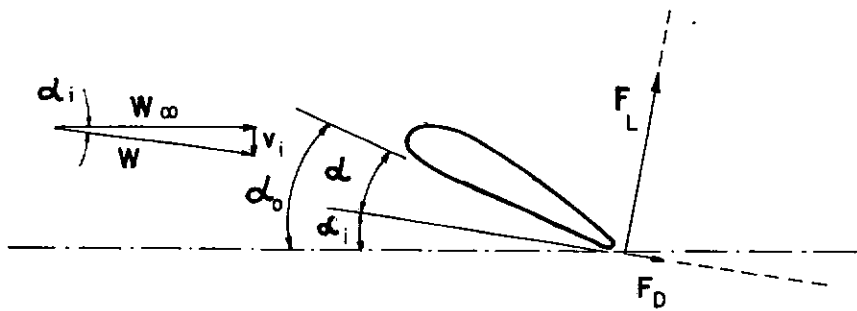


Fig. II.9 - Velocidade induzida

II.2.2 - Diagrama de Velocidades e Forças Aerodinâmicas em uma Seção r do Rotor Eólico (Figura II.10)

Para uma seção genérica da pá do rotor eólico com velocidade angular ω e velocidade do vento V temos os seguintes diagramas ⁵:

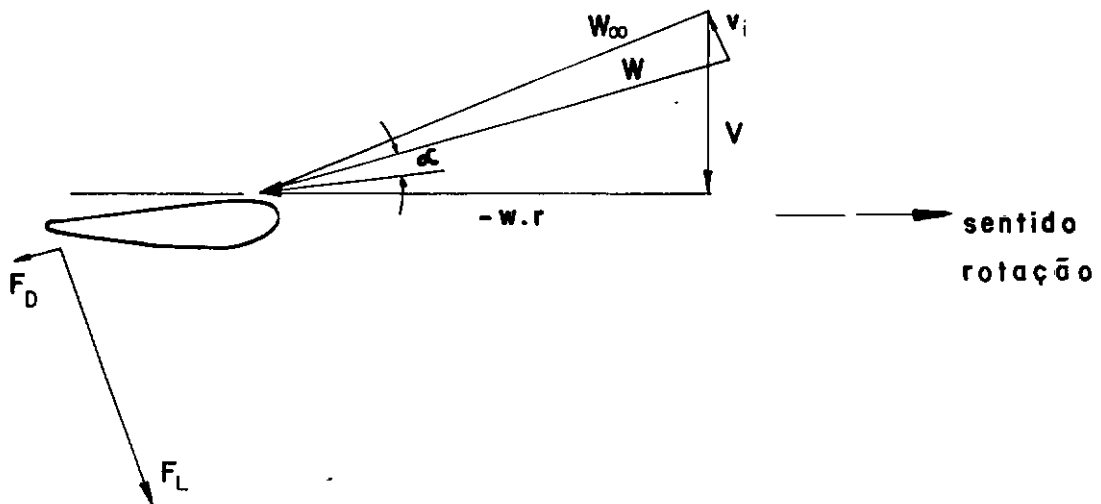


Fig. II.10 - Diagrama de velocidades e forças aerodinâmicas de uma seção da pá

II.2.3 - Origem das Forças de Sustentação e Arrasto

Considerando o escoamento em torno de um corpo assimétrico ou cujo eixo de simetria \tilde{e} não é paralelo ao sentido do fluxo (α), tem-se um campo de velocidade e pressão não uniforme e diferente em cada lado do corpo (Figura II.11).

A diferença de pressão existente originará uma força líquida sobre este corpo. Em adição a esta força tem-se a força devido a viscosidade do fluido que é tangencial a superfície do corpo em todos os pontos. A componente destas forças paralela a direção do fluxo é denominada de arrasto e a componente normal de sustentação.

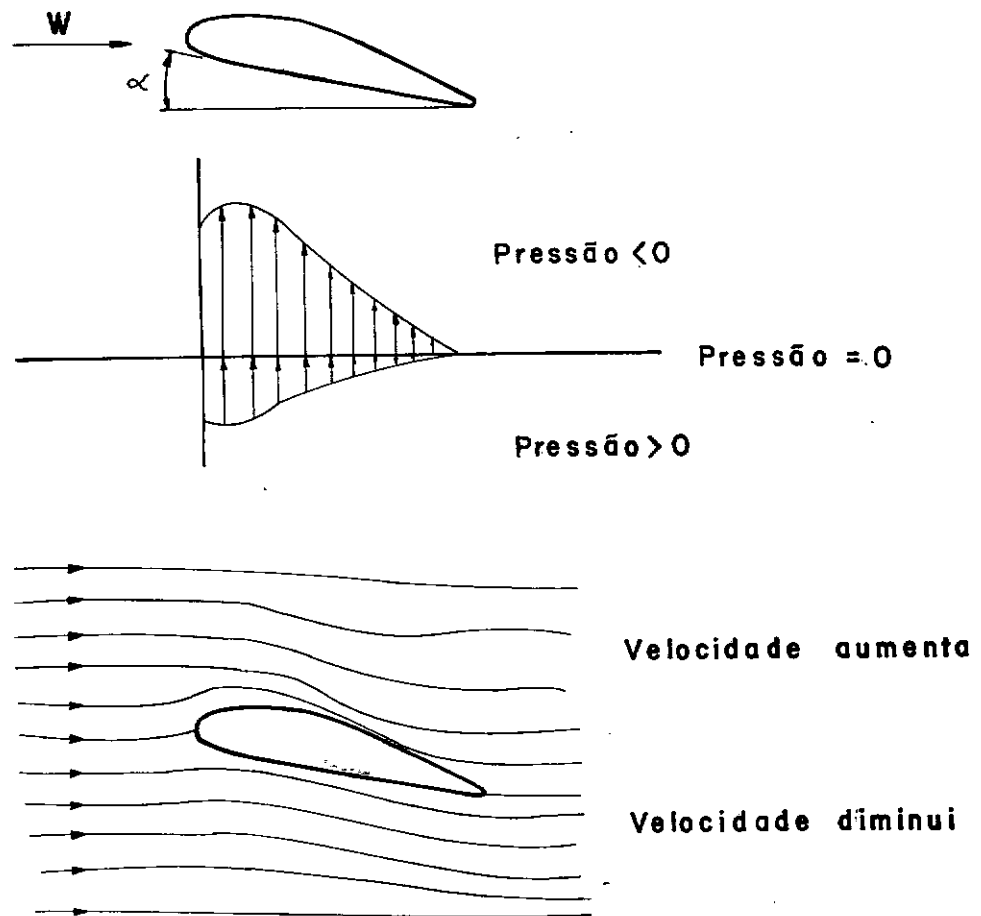


Fig. II.11 - Campo velocidade e pressão

A força de arrasto pode ser dividida em duas componentes que são:

- arrasto devido ao campo de pressões que depende da forma e orientação do corpo e conseqüentemente do ponto de descolamento do fluxo
- arrasto viscoso devido a viscosidade do fluido que depende das características da camada limite em torno do corpo

No escoamento sobre um corpo ($Re > 10^5$) são identificadas duas regiões distintas. Na primeira ocorre a predominância de forças de inércia e os efeitos viscosos podem ser desprezados. A outra região, é caracterizada pela predominância das forças viscosas sendo definida pela camada limite na qual, a condição de não deslizamento da partícula fluida sobre a superfície do corpo deve ser satisfeita.

A figura a seguir ilustra o escoamento na camada limite com gradientes de pressão negativo e positivo $|\overset{3}{|}$, $|\overset{6}{|}$.

A interpretação física destes gradientes traz algumas conclusões importantes no que se refere ao comportamento de um aerofólio.

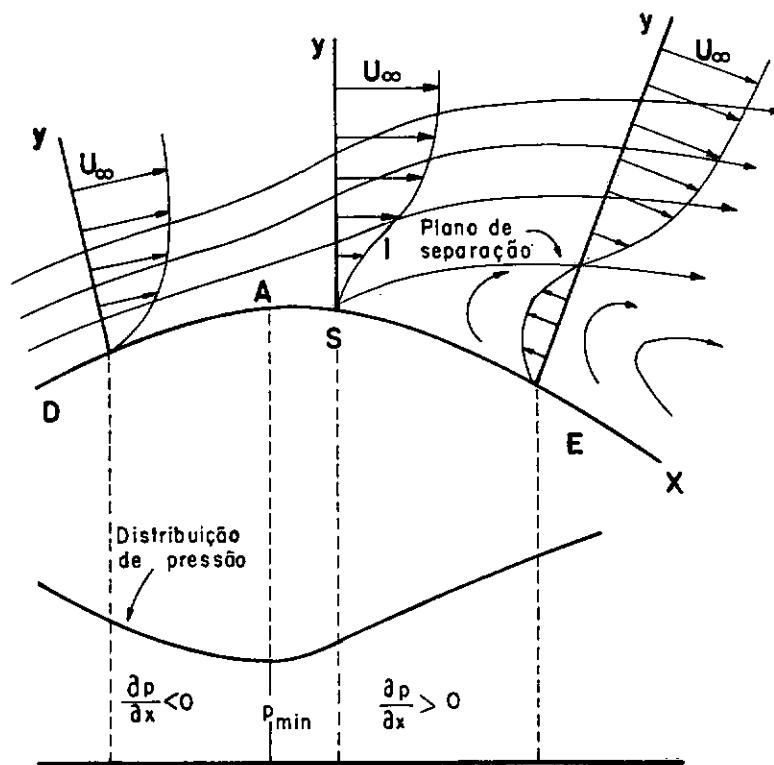


Fig. II.12 - Escoamento na camada limite

As partículas fluidas que se movem na camada limite são desaceleradas em virtude da viscosidade, reduzindo a sua energia cinética. No caso de se ter uma queda de pressão no sentido do escoamento ($\partial p / \partial x < 0$), esta força líquida supera a desaceleração das partículas mantendo-as em movimento. Inversamente, um gradiente de pressão positivo vai provocar a desaceleração das partículas na camada limite ainda mais. Em virtude disto, a espessura da camada limite começa a aumentar, com a consequente diminuição da velocidade das partículas podendo originar inclusive um fluxo no sentido contrário. Este fluxo reverso tende a separar a camada limite e o corpo provocando o descolamento. Neste instante se forma um plano de separação entre as duas regiões

distintas. Este plano é instável e degenera em vórtices [3]. A energia consumida na geração destes vórtices não pode mais ser recuperada causando uma resistência adicional entre o corpo e o fluido.

É no entanto, importante ressaltar que um gradiente de pressão adverso é uma condição necessária para que ocorra descolamento o que não significa que sempre que tivermos um gradiente adverso ocorra o descolamento da camada limite.

O regime de escoamento na camada limite tem um efeito pronunciado sobre a separação. Neste sentido, a camada limite turbulenta possui um perfil de velocidade muito mais cheio que o da camada limite laminar. Portanto, o perfil de velocidade turbulento, na mesma velocidade da corrente de fluxo principal, possui muito mais quantidade de movimento e a separação ocorre quando a quantidade de movimento das camadas de fluido próximas à superfície é reduzida a zero pela ação combinada da pressão e forças viscosas. Concluindo, pode-se dizer que uma camada limite turbulenta pode resistir melhor a um gradiente de pressão adverso.

Os aerofólios podem ser divididos em dois grupos:

- aerofólios convencionais onde ocorre a transição do regime laminar para o turbulento na camada limite no ponto de espessura máxima

- aerofólios de escoamento laminar ^[4] nos quais a camada limite é mantida no regime laminar através de um gradiente de pressão favorável deslocando-se o ponto de espessura máxima para a parte posterior do aerofólio.

Os perfis aerodinâmicos normalmente até agora utilizados em rotores eólicos são do tipo convencional, o que significa dizer que a transição do regime de escoamento ocorre normalmente no ponto de espessura máxima.

II.2.4 - Análise Dimensional do Escoamento sobre um Aerofólio

No estudo de diversos fenômenos em Mecânica dos Fluidos observa-se que eles dependem de maneira complexa dos parâmetros geométricos e de escoamento.

No caso de um aerofólio em que, as velocidades de escoamento são menores do que a velocidade do som neste meio, é possível afirmar que o escoamento é incompressível e a presença da força de gravidade também não terá nenhuma influência direta no padrão de escoamento ^[4]. Logo, haverá a predominância das forças de inércia e viscosas cuja relação, pode ser traduzida pelo número de Reynolds.

Em um escoamento incompressível, sem superfície livre, os coeficientes de sustentação e arrasto do aerofólio serão então funções do número de Reynolds e do ângulo de ataque.

II.2.5 - Definição dos Coeficientes de Sustentação e Arraste

$$C_L = F_L / \frac{1}{2} \rho A W^2$$

$$C_D = F_D / \frac{1}{2} \rho A W^2$$

$$A = L.C(r)$$

Para o caso de um aerofólio o número de Reynolds é definido em relação à corda do perfil

$$Re = \frac{W.C}{\nu}$$

II.2.6 - Regimes de Escoamento em Torno de um Aerofólio

Em rotores eólicos encontra-se na maior parte das vezes escoamentos à altos números de Reynolds ($> 10^5$). Em escoamento à altos números são predominantes as forças de inércia, sendo os efeitos viscosos restritos somente à região da camada limite.

Para um aerofólio a camada limite permanece pequena e dependendo do ângulo de ataque não ocorre descolamento. Para que a possibilidade de descolamento seja minimizada é importante que ocorra a transição do regime laminar para o turbulento na camada limite. Esta transição está diretamente associada ao tipo de perfil, à rugosidade da superfície e à turbulência do escoamento [4]. Fica claro portanto que, a redução do arrasto,

associada a este fato não ocorre num único valor do número de Reynolds.

II.3 - COEFICIENTES DE ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM ROTOR EÓLICO

Para rotores eólicos de eixo horizontal são utilizados cinco coeficientes adimensionais definidos a partir da análise dimensional ^[8]. São eles:

Coeficiente de Potência ou Eficiência

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_V V^3} = \frac{P}{\frac{\pi}{8} \rho D^2 V^3}$$

Coeficiente de Torque

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{4} \rho V^2 A_V D} = \frac{T}{\frac{\pi}{16} \rho D^3 V^2}$$

Coeficiente de Empuxo

$$C_E = \frac{E}{\frac{1}{2} \rho A_V V^2} = \frac{E}{\frac{\pi}{8} \rho D^2 V^2}$$

Razão de Velocidade

É a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento

$$R V = \frac{w \cdot R}{\nu}$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

II.4 - ANÁLISE DA CURVA TORQUE x VELOCIDADE ANGULAR

À partir do gráfico (Figura II.13) podemos observar duas regiões características da curva $T \times w$ do rotor eólico ou seja, no lado esquerdo (AB) a rotação e o torque crescem ou decrescem simultaneamente e no lado direito (BC) a rotação e o torque tem comportamento contrário o que significa que a rotação cresce e o torque decresce ou vice-versa.

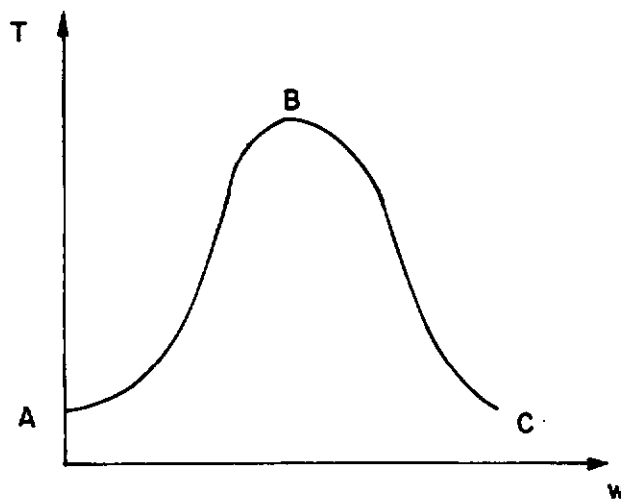


Fig. II.13 - Curva $T \times w$ rotor eólico tipo hélice

Para o conhecimento das características de desempenho é necessário o levantamento da curva acima com a utilização de um sistema de freio. Duas condições diferentes de teste, podem ser utilizados e, são elas:

- velocidade de vento variável
- velocidade de vento constante

Na primeira situação a rotação do rotor é mantida constante e variando-se a velocidade do vento varre-se toda a faixa de razão de velocidade medindo-se o torque líquido.

No segundo caso a rotação do rotor é variada em função do torque resistivo mantendo-se a velocidade do vento constante. Este procedimento traz uma limitação para o teste de rotores eólicos tipo hélice. Na Figura II.14 podemos observar que a partir do ponto B, diminuindo-se o valor de w , o torque resistivo continua aumentando e o torque fornecido diminui podendo-se dizer que:

$$\text{Potência Fornecida} = T_R \cdot \omega_R (P_F)$$

$$\text{Potência Consumida} = T_C \cdot \omega_C (P_C)$$

$$T_R < T_C$$

Considerando-se que para atingir uma condição de equilíbrio é necessário que $\omega_R = \omega_C = \omega_1 = \frac{te}{c}$, o que nos leva a concluir que $P_C > P_F$ ($V = \frac{te}{c}$). Neste caso o rotor irá desacelerando até a velocidade angular igual a zero.

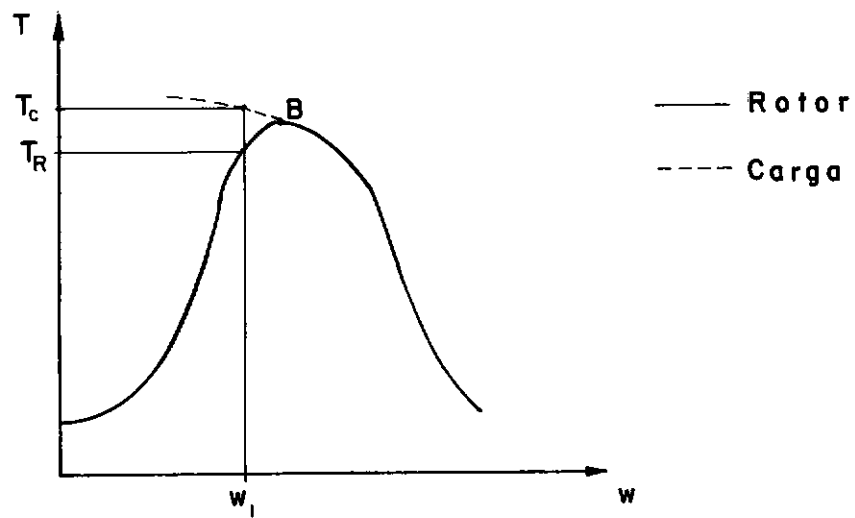


Fig. II.14 - Curva $T \times w$ para rotor eólico e carga

Portanto, utilizando-se um sistema mecânico que possui o comportamento descrito anteriormente é possível somente a medição dos valores relativos ao lado direito da curva para condição de vento constante.

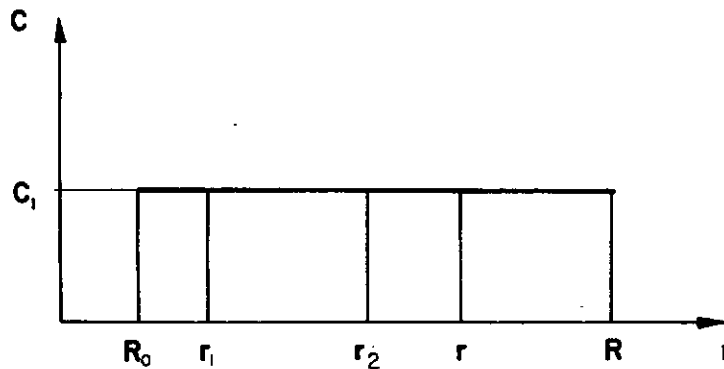
II.5 - DEFINIÇÃO DA FAMÍLIA DE ROTORES EÓLICOS

O compromisso com a simplicidade do rotor eólico, que pode levar à facilidades de construção, produção seriada e consequentemente um baixo custo por unidade de potência gerada conduziu à certas condições previamente estabelecidas que são:

- pás sem torção
- corda constante ao longo do comprimento da pá
- mesmo perfil ao longo do comprimento da pá

II.5.1 - Distribuição da Corda do Perfil ao Longo da Pã

A distribuição da corda \bar{c} é constante ao longo da pã, o que significa que o comprimento em todas as seções \bar{c} é constante ou seja, $c(r) = \bar{c}^{te}$ (Figura II.15).



$$C(r_1) = C(r_2) = C(r) = C_1 = \bar{c}^{te}$$

Fig. II.15 - Distribuição da corda

$$c(r_1) = c(r_2) = c(r) = c_1 = \bar{c}^{te}$$

II.5.2 - Ângulo de Cada Seção em Relação ao Plano de Rotação

A pã não terá torção ou seja, o ângulo de cada seção com o plano de rotação será o mesmo, o que equivale a dizer que a relação $H'(r/R)$ é linear. No entanto, a relação $H'(r/R)$ pode assumir diversos coeficientes angulares para a família, o que significa que a pã pode ter diversos ângulos com o plano de

rotação.

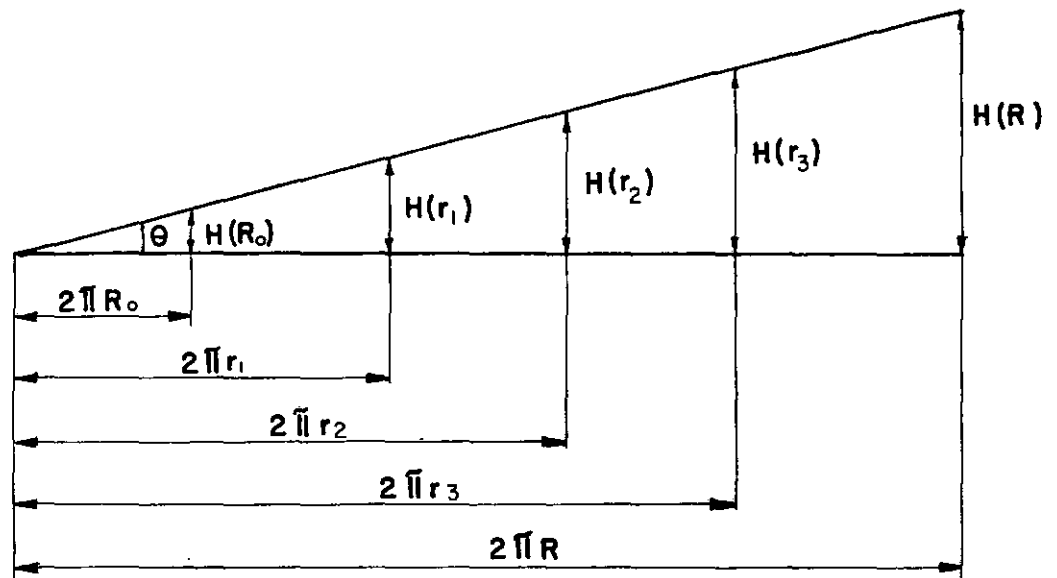


Fig. II.16 - Passo para diversas seções da pã

A partir da Figura II.16 podemos escrever que:

$$H'(r/R) = C \cdot \frac{r}{R} \quad C = 2\pi \operatorname{tg}\theta$$

II.5.3 - Perfil Aerodinâmico

O perfil aerodinâmico adotado será o mesmo ao longo do comprimento da pã. O perfil será de forma simples o que significa dizer que na sua parte inferior o mesmo será plano gerando pãs sem partes convexas.

Com estas três condições previamente estabelecidas é possível se pensar em um processo de fabricação da pá que não seja artesanal e que possa redundar em custos mais baixos.

Esta configuração simples no entanto, traz sacrifícios no que se refere à eficiência aerodinâmica do rotor, aspecto que é plenamente justificável tendo em vista que é na faixa de pequena e média potência que se justificam a utilização destes rotores pertencentes à uma família. Na faixa de grandes potências, quando os investimentos são maiores, rotores de uma família poderão ser eventualmente utilizados como ponto de partida para análises e testes mais sofisticados e dispendiosos como o caso exige.

Considerando as três premissas básicas descritas anteriormente, a família será caracterizada por:

NUMERO ROTOR EOLICO	NUMERO PAS	SOLIDEZ	COR DA DA PA DO MODE LO REDUZIDO (mm)	ANGULO DA PA θ (GRAUS)	PERFIL AERODI NAMICO	CONFIGURACAO DO ROTOR EOLICO
A.3.10.1058	03	0,1058	31,0	10	GÖTTINGEN 624	EIXO HORIZONTAL - UPWIND - ÂNGULO CAIMENTO NULO
A.3.15.1058	03	0,1058	31,0	15		
A.3.20.1058	03	0,1058	31,0	20		
A.3.25.1058	03	0,1058	31,0	25		
A.3.30.1058	03	0,1058	31,0	30		
A.3.10.1349	03	0,1349	39,5	10		
A.3.15.1349	03	0,1349	39,5	15		
A.3.20.1349	03	0,1349	39,5	20		
A.3.25.1349	03	0,1349	39,5	25		
A.3.30.1349	03	0,1349	39,5	30		
A.3.10.1639	03	0,1639	48,0	10		
A.3.15.1639	03	0,1639	48,0	15		
A.3.20.1639	03	0,1639	48,0	20		
A.3.25.1639	03	0,1639	48,0	25		
A.3.30.1639	03	0,1639	48,0	30		
A.3.10.2031	03	0,2031	59,5	10		
A.3.15.2031	03	0,2031	59,5	15		
A.3.20.2031	03	0,2031	59,5	20		
A.3.25.2031	03	0,2031	59,5	25		
A.3.30.2031	03	0,2031	59,5	30		

Características da Família A

A partir dos modelos caracterizados na tabela anterior, é importante notar que a obtenção das características aerodinâmicas dos diversos rotores que compõem a família foi variando-se sistematicamente a solidez e ângulo da pá com o plano de rotação. Resumindo, tem-se a seguinte tabela:

N	σ	θ
3	0,1058	$10^\circ - 30^\circ$ $\Delta = 5^\circ$
3	0,1349	
3	0,1639	
3	0,2031	

Com esta variação sistemática se chega a um total de vinte configurações que caracterizam esta família.

II.5.4 - Características do Perfil Göttingen 624

O perfil utilizado é o Göttingen 624 e seus coeficientes de sustentação e arrasto estão listados nas Tabelas II.1 e II.2 para os números de Reynolds iguais a $1,1 \times 10^5$ e $4,2 \times 10^5$ respectivamente.

A partir dos dados de coeficientes de sustentação e arrasto verifica-se que a relação entre C_L e C_D para o ângulo de ataque ótimo é de 54 para um $Re = 4,2 \times 10^5$. É importante observar que o mesmo perfil para um $Re = 1,1 \times 10^5$ tem uma relação C_L/C_D máxima de 24 o que corresponde a menos de 50% do valor anterior. Pelas tabelas de dados do perfil pode-se concluir

que não ocorre uma variação acentuada no valor do : coeficiente de sustentação e sim no coeficiente de arrasto. Tal fato pode ser explicado pelo que foi descrito nos itens II.2.3 e II.2.6.

A seguir são listados os coeficientes de sustentação e arrasto e as coordenadas do perfil Gö 624.

Coordenadas do Perfil (% da corda do perfil)

x	0	1.25	2.50	5.00	7.50	10	15	20	
y_s	4.00	7.15	8.50	10.40	11.75	12.85	14.35	15.30	
y_i	4.00	2.25	1.65	0.95	0.60	0.40	0.15	0.05	
x	30	40	50	60	70	80	90	45	100
y_s	16.00	15.40	14.05	12.00	9.50	6.60	3.55	2.00	0.30
y_i	0	0	0	0	0	0	0	0	0

y_s = coordenada do lado de baixa pressão

y_i = coordenada do lado de alta pressão

x = abcissa do perfil

Coeficientes de Sustentação e Arrasto

α	C_L	$100 \cdot C_D$	C_L/C_D
$Re = 1,1 \times 10^5$			
- 11,3	- 0,141	11,97	-
- 8,7	- 0,082	6,05	-
- 6,3	0,082	4,02	2,03
- 4,2	0,264	3,89	6,78
- 2,2	0,489	3,35	14,59
- 0,2	0,694	3,19	21,75
2,3	0,834	3,95	21,11
4,0	1,030	4,40	23,40
6,7	1,181	4,98	23,71
9,0	1,318	6,84	19,26
9,7	1,332	9,30	14,32
10,6	1,310	13,76	9,52
12,9	1,143	20,30	5,63

TABELA II.1 - Coeficientes de sustentação e arrasto

α	C_L	$100 \cdot C_D$	C_L/C_D
$Re = 4,2 \times 10^5$			
- 11,1	- 0,191	9,66	-
- 8,4	- 0,132	1,71	-
- 6,2	- 0,066	1,49	4,42
- 4,2	0,268	1,41	19,00
- 2,1	0,467	1,36	34,33
+ 0,0	0,672	1,29	52,09
2,0	0,870	1,60	54,37
4,1	1,056	1,96	53,87
6,5	1,214	2,47	49,14
8,8	1,360	3,49	38,96
10,1	1,404	4,59	30,58
11,6	1,408	6,62	21,26
14,7	1,370	12,01	11,40

TABELA II.2 - Coeficientes de sustentação e arrasto

II.5.5 - Cálculo do Momento de Inércia, Volume de Material e
Peso do Conjunto de Pás para a Família A

Para cálculo do momento de inércia e da quantidade de material empregado na confecção de uma pá determina-se um raio equivalente função da corda do perfil.

O momento de inércia da pá é calculado do mesmo modo que uma barra de raio igual ao raio equivalente, em virtude das seções da pá serem todas iguais ou seja, a função $c(r) = c_{te}$.

Para o cálculo do raio equivalente subdividiu-se o perfil em 22 áreas calculadas em função da corda do perfil. Este valor foi igualado à área de uma circunferência encontrando-se o raio equivalente, em função solidez, número de pás e diâmetro do rotor eólico, que é descrito pela seguinte equação:

$$r_{eq} = 142,1290 \times \frac{\sigma \times D^2}{N} \quad (\text{Apêndice I})$$

A partir deste valor e do conhecimento do peso específico do material podemos calcular o volume de material de cada pá, o peso de cada pá e o seu momento de inércia com as seguintes equações:

Volume:

$$V = \pi \times r_{eq}^2 \times L$$

Peso:

$$P_e = \pi \times r_{eq}^2 \times L \times \gamma_1$$

γ_1 = peso específico do material da pá

$$P_e = V \times \gamma_1$$

Momento de Inércia I^9 :

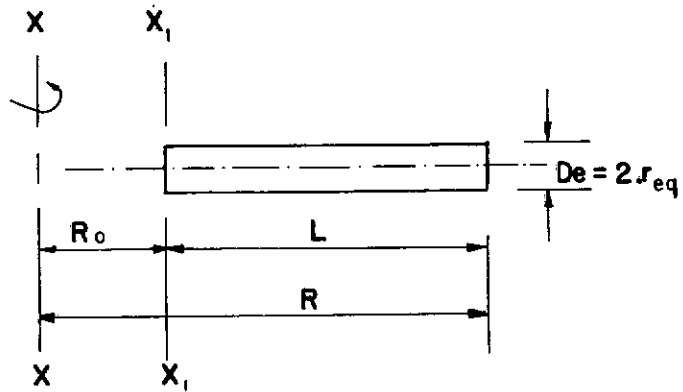


Fig. II.17

$$I_{x_1 x_1} = \frac{1}{4} m r_{eq}^2 + \frac{1}{3} m L^2$$

$$I_{xx} = I_{yy_1} + m R_0^2$$

$$I_{xx} = m \left(\frac{1}{4} r_{eq}^2 + \frac{1}{3} L^2 + R_0^2 \right) \quad \text{onde,}$$

$$m = \frac{P_e}{g}$$

II.5.6 - Números de Reynolds para os Modelos Reduzidos

A utilização dos resultados gerados em túnel de vento em unidades maiores, só é válida quando existir a similaridade geométrica, cinemática e dinâmica. Para que se possa garantir todas estas condições de similaridade [4] é importante a análise do número de Reynolds para os modelos reduzidos, nas condi-

ções de escoamento disponíveis no túnel de vento. Na Tabela II.3 é possível a verificação dos valores de Re, considerando a velocidade do escoamento igual a 9,0 m/s e razão de velocidade igual a 6,4 e 2. Os números de Reynolds são definidos do seguinte modo:

$$Re_1 = \frac{V \cdot (1 + RV^2)^{1/2} C}{\nu}$$

$$Re_2 = \frac{V \cdot D}{\nu}, \text{ onde: } D = 2R$$

σ	N	C	RV	Re_1	Re_2	D	V
		(mm)				(m)	(m/s)
0,1058	3	31,0	6	$1,06 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	0,45	9,0
0,1058	3	31,0	4	$0,71 \times 10^5$			
0,1058	3	31,0	2	$0,38 \times 10^5$			
0,1349	3	39,5	6	$1,35 \times 10^5$			
0,1349	3	39,5	4	$0,91 \times 10^5$			
0,1349	3	39,5	2	$0,49 \times 10^5$			
0,1639	3	48,0	6	$1,60 \times 10^5$			
0,1639	3	48,0	4	$1,11 \times 10^5$			
0,1639	3	48,0	2	$0,60 \times 10^5$			
0,2031	3	59,5	6	$2,03 \times 10^5$			
0,2031	3	59,5	4	$1,37 \times 10^5$			
0,2031	3	59,5	2	$0,74 \times 10^5$			

TABELA II.3 - Número de Reynolds para os modelos reduzidos

II.5.7 - Número dos Rotores Eólicos da Família

O número utilizado para designação dos rotores eólico é composto de oito dígitos ou seja, uma letra e sete números. A

definição destes dígitos alfa-numéricos é feita do seguinte modo:

- Caracter Alfabético

Representa a família no que diz respeito ao perfil aerodinâmico, a distribuição da corda e do passo ao longo do comprimento da pá, ângulo de caimento, posição do rotor em relação ao vento e a relação bossa/diâmetro. A letra utilizada para esta família é A.

- Caracteres Numéricos

O próximo caracter representa o número de pás do rotor tipo hélice podendo variar de 2 a 8. O conjunto dos dois caracteres seguintes representa o ângulo da pá com o plano de rotação ou seja, com ele pode-se definir o passo do rotor eólico. Os quatro próximos caracteres representam a solidez do rotor eólico múltiplo de 10^4 ou seja, o valor real de solidez é obtido multiplicando o valor indicado por 10^{-4} .

Exemplo:

A	-	3	-	10	-	1058
↑		↑		↑		↑
família "A"		N		Θ		$\sigma \times 10^4$

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

III.1 - TÚNEL DE VENTO II

No laboratório de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica tem-se disponível um túnel de vento de circuito aberto e escoamento forçado (sopra). A seção de testes é quadrada com dimensão interna de 1,00 m x 1,00 m. O ventilador é centrífugo - rotor tipo F e a regularização do escoamento é feita utilizando-se um sistema de "honey-comb" e uma tela para quebra de vórtices. A velocidade máxima é de aproximadamente 9,0 m/s e as condições de escoamento na câmara de testes são deficientes em virtude da turbulência e assimetria do escoamento.

Deste modo para medição da velocidade do vento na seção de testes foi definido um ponto que representa a velocidade média em relação à seção transversal. A determinação deste ponto, realizada por Calache [10], foi obtida definindo-se uma malha de 42 pontos a partir dos quais, para diversas velocidades do vento, foi fixada a posição representativa para medição da velocidade um metro à montante da seção de testes.

III.1.1 - Dimensão dos Modelos Reduzidos

Quanto menor a relação entre a área do modelo reduzido e a área transversal da seção de testes, menores serão os efei-

tos oriundos da presença das paredes do túnel de vento que criam uma condição de escoamento diferente ao que ocorreria no ar livre. Deste modo adotou-se como diâmetro máximo para os rotores eólicos a serem testados o valor de 450 mm, que representa uma área varrida de $0,159 \text{ m}^2$ ou seja aproximadamente 16% da área transversal da seção de testes, a partir de um compromisso com o desenvolvimento do sistema de medida e de pás que desta maneira adquirem dimensões razoáveis para a sua melhor execução prática.

III.2 - TORQUÍMETRO LMF-A2

A partir da existência do túnel de vento II no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica - COPPE/UFRJ foi desenvolvido um sistema para testes de modelos reduzidos de rotores eólicos de eixo horizontal que possibilita a avaliação simultânea das três variáveis, rotação, empuxo e torque, com as quais é possível a avaliação do desempenho aerodinâmico de determinada configuração de um conjunto de pás.

Este desenvolvimento pode ser caracterizado por seis fases distintas que foram:

- projeto mecânico
- projeto dos sistemas de medidas
- execução do equipamento
- testes experimentais preliminares
- calibração e levantamento das curvas do sistema de medidas
- testes práticos com rotores eólicos

O maior problema encontrado na concepção básica do sistema foi com respeito à característica do rotor eólico de eixo horizontal tipo hélice em virtude do mesmo apresentar uma curva característica de $T \times w$ que conduz à um problema de medição. Das duas possibilidades, descritas no item II.4, foi escolhida a condição de teste com velocidade do vento constante, ficando claro portanto que, com este sistema experimental é possível a medição parcial dos dados de desempenho do rotor eólico.

Para a condição na qual o torquímetro não permite o levantamento dos dados, o torque é levantado de maneira indireta a partir da obtenção da curva de rotação x tempo. Esta curva é obtida registrando-se a velocidade angular do rotor eólico a partir do repouso até o mesmo atingir a rotação máxima para condição de vento máxima e constante do túnel. Pode-se então dizer que:

T_{carga} = Torque resistivo nos mancais

$$T_{\text{rotor}} = I \frac{dw}{dt} + T_{\text{carga}} \quad (\text{III.1})$$

Na Eq. (III.1) para cálculo do torque fornecido pelo rotor eólico, observa-se que as duas parcelas do segundo membro da equação são conhecidos. O primeiro é obtido derivando-se a curva de rotação x tempo e o segundo representa as perdas mecânicas levantadas para o conjunto de mancais do torquímetro. 0

cálculo do momento de inércia não apresenta maiores dificuldades e de qualquer modo deverá ocorrer a coincidência dos valores medidos pelos dois métodos, o que eventualmente pode levar a execução de algumas correções em relação aos dados calculados em virtude deste procedimento permitir que se obtenha uma descrição aproximada para a condição em que não é possível o levantamento dos pontos experimentais utilizando-se o sistema de freio, pois o padrão de escoamento é não-permanente em virtude do rotor eólico estar acelerando.

Uma das fases mais importantes no desenvolvimento do torquímetro foram os testes experimentais para avaliação do desempenho do equipamento e periféricos no que se refere ao tipo de resposta dos sistemas de medida. É importante ressaltar que foram encontradas dificuldades com relação ao freio mecânico, pois a resposta do mesmo apresentava oscilações bastante consideráveis que impossibilitavam inclusive o registro gráfico do sinal. A solução foi obtida fixando-se a sapata [1] e as pastilhas [3] respectivamente sobre um conjunto de três molas [4] e borracha de neoprene [3].

Resolvidos os problemas mecânicos básicos passou-se à calibração dos sistemas de medidas para obtenção das curvas de calibração e respectivas equações correspondentes.

A última fase do desenvolvimento pode ser caracterizada pelos testes práticos de rotores eólicos com os quais foram realizados exaustivos testes a fim de se levantar a confiabilidade do sistema como um todo. A preocupação principal foi

com relação à repetibilidade dos resultados para uma "mesma condição de vento".

III.2.1 - Descrição da Concepção Básica

No Apêndice IV encontra-se o DES-01 e um conjunto de fotografias relativas ao sistema completo de medidas.

III.2.1.1 - Dimensões Principais do Conjunto

O diâmetro externo do torquímetro é de 88 mm e o comprimento total de 465 mm. Internamente o diâmetro disponível para a localização dos sistemas de medição é de 56 mm na parte frontal e 54 mm na região posterior.

III.2.1.2 - Fixação do Conjunto no Túnel de Vento

Foram montados no túnel de vento, na sua parte inferior, dois perfis metálicos aos quais são parafusados os elementos simétricos (Apêndice IV - Fotografia 01), e na parte superior externamente outro perfil metálico ao qual é fixado o terceiro elemento simétrico. Todo este conjunto de fixação é dotado de um sistema de ajuste que permite a localização correta do torquímetro em relação a seção de testes e o seu perfeito nivelamento. Estes três elementos simétricos são solidários ao torquímetro, o que possibilita operações de montagem e ajustes rápidos e simples.

III.2.1.3 - Sistema de Pás

O torquímetro possui na parte frontal uma bolacha [18] com um sistema de fixação das pás que possibilita a variação do número de pás e do seu ângulo em relação ao plano de rotação. O eixo das pás é fixado a bolacha por intermédio de dois parafusos, mantendo-se deste modo o grau de liberdade (rotação) em torno do seu eixo para variação do ângulo θ da pá.

O ângulo θ da pá é variado de 10^0 a 30^0 ($\Delta = 5^0$) o que leva à necessidade de se ter um gabarito de montagem. Para este tipo de rotor eólico foi montado um sistema, através do qual com os gabaritos dos diversos ângulos θ é posicionada a pá em relação à seu plano de rotação (Apêndice IV - Fotografia 02).

A variação do número de pás é dependente do número de pontos de fixação determinados para bolacha, de modo que podem ser testados rotores com 2 à 36 pás. A dimensão da pá referente a sua corda é variável de acordo com a solidez adotada.

III.2.1.4 - Sistema de Mancais

Para a avaliação simultânea da rotação, torque e empuxo é necessário que o eixo do torquímetro possua dois graus de liberdade, rotação e translação no sentido axial. Estes dois movimentos simultâneos são obtidos com a utilização de um rolamento de esferas e uma bucha de esferas [17] montados concentricamente, permitindo que o segundo tenha um movimento de rotação e

possibilite o deslocamento axial do eixo. No desenho de conjunto (Apêndice IV - Desenho 01) os mancais estão pintados na cor laranja.

III.2.1.5 - Sistema de Medição de Torque

Para avaliação da potência desenvolvida pelo rotor eólico é necessário o conhecimento do torque fornecido nos diversos regimes de rotação. É utilizado um freio mecânico para a variação do torque resistivo.

O conjunto de forma cilíndrica está montado sobre dois mancais de rolamentos, um de esferas e outro auto-compensador, na parte posterior do torquímetro (Apêndice IV - Fotografias 04 e 06). Este sistema de mancais permite que todo o sistema de freio tenha um grau de liberdade em relação ao seu movimento de rotação. No interior do freio está montado o sistema de sapatas que pode ser sub-dividido em duas partes:

- as sapatas de frenagem montadas sobre um conjunto solidário ao movimento de rotação do eixo do torquímetro e com um grau de liberdade em relação ao seu movimento axial [2]
- o disco de frenagem solidário à carcaça externa do freio [1]

As sapatas de frenagem são montadas sobre buchas de neoprene e o disco de frenagem sobre três molas a fim de se minimizar os desalinhamentos atenuando-se as oscilações nas medidas. Quando o conjunto de sapatas é deslocado no sentido axial,

entrando em contato com o disco de frenagem todo o conjunto de freio sofrerá um deslocamento no sentido angular, que é limitado pelo elemento de medição do torque, em função das forças de atrito que serão desenvolvidas. Na medida em que a força de contato entre o disco e as sapatas é aumentada, as forças de atrito irão aumentando e conseqüentemente o torque resistivo. O aumento destas forças de contato é obtido externamente por intermédio de um parafuso e uma mola [5] que permite pequenas variações da força de contato, função de sua constante elástica. (Apêndice IV - Fotografia 06 e Desenho 01). Com este sistema de deslocamento da sapata móvel é possível uma melhor variação das forças de atrito ou seja, do torque resistivo.

A quantificação das forças de frenagem é feita através da medição da deflexão de uma barra engastada, quantificada por quatro extensômetros elétricos localizados junto ao engastamento (Apêndice IV - Fotografia 06).

O conjunto de peças básicas que compõem o sistema de torque está pintado na cor amarela no Desenho 01 do Apêndice IV.

III.2.1.6 - Sistema de Medição de Empuxo

Para avaliação do empuxo desenvolvido pelo rotor eólico é utilizado um conjunto de molas [13] que são comprimidas. Para tanto, o eixo do torquímetro se desloca no sentido axial e a quantificação da força, desenvolvida será através da medição deste deslocamento.

Na parte frontal do torquímetro está montado um copo metálico [9] solidário ao eixo e, este anteparo móvel irá restringir a intensidade de luz incidente sobre um foto-resistor [10] de acordo com o deslocamento do eixo (Apêndice IV - Fotografias 04 e 05). As molas [13], no total de três, estão localizadas no acoplamento que se encontra na frente da parte posterior do torquímetro e são montadas sobre pinos guia [14], que se deslocam sobre buchas de teflon [12] quando ocorre a deflexão dos mesmos.

O conjunto de peças básicas que compõem o sistema de empuxo está pintado na cor azul claro no Desenho 01 do Apêndice IV.

III.2.1.7 - Sistema de Medição da Rotação

A rotação do rotor eólico é avaliada através de um sistema fotoelétrico [12]. O sistema é composto por um disco metálico [15] montado de forma solidária ao eixo do torquímetro e uma célula fotoelétrica [16] (Apêndice IV - Fotografias 04 e 05). O disco metálico possui na região externa 30 furos, através dos quais irão ocorrer interrupções da luz incidente no receptor. O conjunto de peças básicas que compõem o sistema de rotação está pintado na cor verde no Desenho 01 do Apêndice IV.

III.2.1.8 - Detalhes Gerais

O acesso à parte traseira do torquímetro, onde se localizam o sistema de medição de torque, o acoplamento do sistema

de medição empuxo e o sistema de medição de rotação, é possível retirando-se o tubo de proteção externo, que desliza sobre as três bolachas metálicas, soltando-se dois parafusos de fixação (Apêndice IV - Desenho 01). O acesso à parte frontal onde se localiza o anteparo móvel do sistema de medição de empuxo só é possível desmontando-se o primeiro mancal do torquímetro. No entanto, para a operação de todo o sistema não é necessário o acesso à esta região.

III.2.2 - Descrição Detalhada do Sistema de Medida de Torque

Através deste sistema é possível a quantificação da força resistiva desenvolvida no freio mecânico e consequentemente o valor do torque fornecido pelo rotor eólico.

III.2.2.1 - Princípio de Funcionamento

O valor da força desenvolvida é medido por intermédio de extensômetros elétricos [7], através dos quais se quantifica a deformação de um elemento flexível [6]. Considerando que as deformações são pequenas, o que permite afirmar que o material está sendo solicitado no regime elástico, é possível estabelecer uma relação constante entre a deformação e valor do torque resistivo.

Os extensômetros elétricos são elementos colados a superfície da lâmina flexível [6] e a sua deformação causa uma variação no valor de sua resistência elétrica, a qual é quantificada (Apêndice IV - Fotografia 06).

No torquímetro LMF-A2 foram utilizados quatro extensômetros elétricos localizados dois na região de compressão e dois na região de tensão junto ao engastamento do elemento flexível. Com estes quatro elementos se tem uma ponte de Wheatstone, sendo medida a deflexão da barra engastada, sob ação do torque resistivo, com auxílio de um amplificador dinâmico.

III.2.2.2 - Esquema Elétrico e Tratamento do Sinal

A alimentação e medição do desequilíbrio da ponte de extensômetros elétricos é feita utilizando-se um amplificador dinâmico de dois canais. Cada canal possui um vernier que permite a variação da amplificação do sinal de leitura. O valor da tensão de alimentação da ponte é de 2,50 volts D.C. e o valor de leitura é de no máximo 2,0 volts D.C. para as deflexões em questão utilizando-se os seletores nas posições 3 ou 4.

No circuito temos:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120 \, \Omega$$

$$E = 2,50 \text{ volts}$$

O amplificador dinâmico é do tipo DINAV e foi fabricado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT da USP - São Paulo.

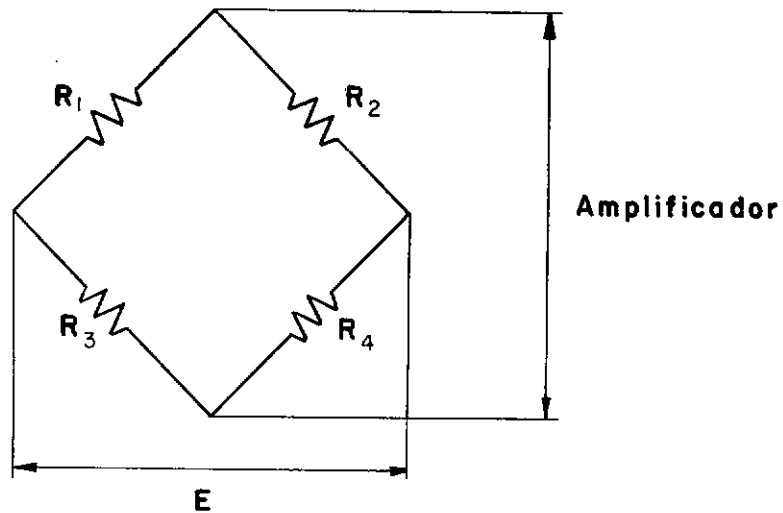


Fig. III.1 - Ponte de extensômetros elétricos

III.2.2.3 - Operação do Sistema de Torque

Através de um cabo blindado, o conjunto de extensômetros elétricos é conectado ao amplificador dinâmico e de acordo com a faixa de torque é selecionado o canal e o seletor previamente estabelecidos.

III.2.2.4 - Leitura e Registro do Sinal do Amplificador Dinâmico

O sinal de tensão em D.C. correspondente ao torque máximo é de aproximadamente 2,0 volts..A leitura deste valor é monitorada diretamente em um voltímetro e/ou registrada em re-

gistrador gráfico.

III.2.2.5 - Faixas de Operação

O sistema de medida do torque resistivo permite a quantificação de torques até o valor de 0,50 N.m. Para uma melhor relação torque resistivo/sinal de leitura o sistema foi dividido em duas faixas de utilização com a aplicação da força resistiva em dois locais distintos [8]. Para a primeira faixa ($\leq 0,25$ N.m) a força é aplicada na extremidade da barra engastada e para a segunda faixa ($\leq 0,50$ N.m) o ponto de aplicação da força é na metade do comprimento da barra (Figura III.2).

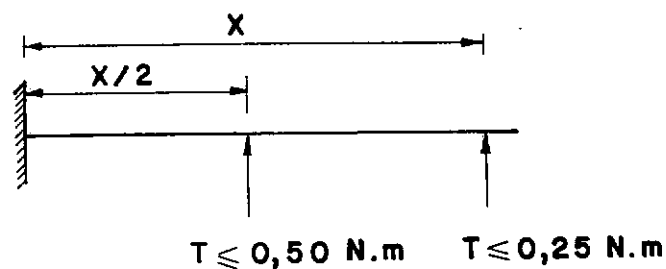


Fig. III.2 - Pontos aplicação da força resistiva

III.2.3 - Descrição Detalhada do Sistema de Medida do Empuxo

III.2.3.1 - Princípio de Funcionamento

A medição do deslocamento do eixo no sentido axial é feito por um transdutor foto-elétrico ^[10] constituído basicamente por um emissor de luz e um receptor foto-sensível. O princípio de funcionamento é baseado na variação da intensidade luminosa provocada pelo movimento do anteparo ^[9] solidário ao eixo, incidente na fotocélula ^[11]. Esta variação de luz provoca uma variação na resistência da fotocélula, diminuindo à medida que a intensidade luminosa aumenta. Em virtude do movimento de rotação do eixo o anteparo tem a forma de um copo que penetra entre a fonte luminosa e o foto-resistor (Apêndice IV - Fotografia 07).

O sistema que se opõe ao deslocamento é constituído por três molas ^[13] que são sustentadas por pinos-guia ^[14] fixos a parte posterior do acoplamento. Na parte anterior do acoplamento existem três buchas de teflon ^[12] sobre as quais os pinos deslizam (Apêndice IV - Fotografia 05).

III.2.3.2 - Esquema Elétrico e Tratamento do Sinal

O transdutor é alimentado por uma tensão de 6,0 volts D. C. que é mantida estável porque variações de tensão irão modificar a intensidade da fonte luminosa. A tensão de alimentação estabilizada é obtida por intermédio de um circuito de estabili-

zação composto por uma resistência e um zener (Figura III.3).

O transdutor propriamente dito é constituído por um diodo emissor (LED) ligado em série com uma resistência que limita a corrente a 20 mA e de um foto-resistor (LDR) ligado em série a uma resistência que foi escolhida com o objetivo de se obter a maior variação linear de voltagem para uma dada variação de força.

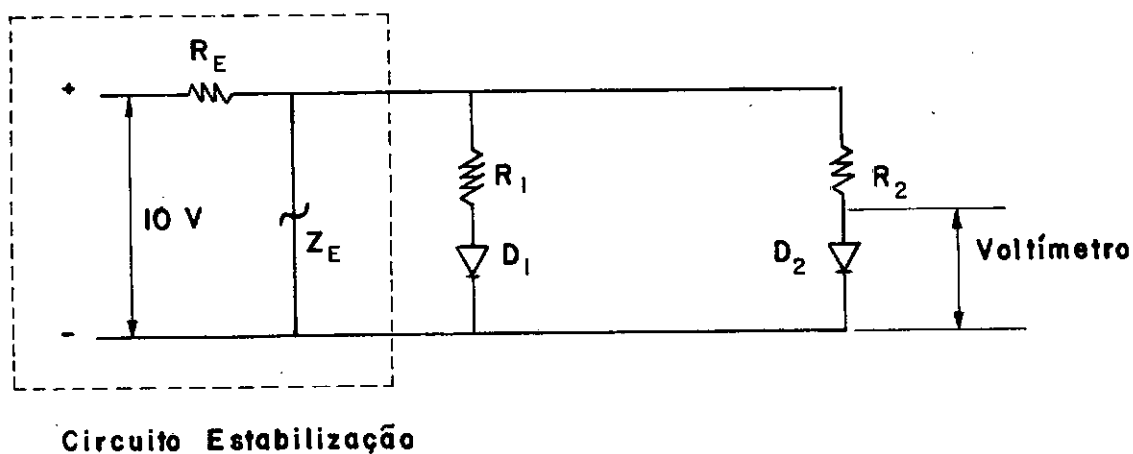


Fig. III.3 - Circuito elétrico do medidor empuxo

No circuito acima tem-se:

$$R_1 = 470 \, \Omega \quad R_2 = 250 \, \Omega \quad R_e = 100 \, \Omega$$

D_1 = diodo emissor

D_2 = foto-resistor

$$Z_e = 6,2 \text{ volts}$$

A leitura de tensão sobre o foto-resistor atinge valores de 4,0 volts D.C. exigindo a redução do seu valor para que seja possível o registro gráfico, o que é obtido utilizando-se um amplificador que reduz em 50% o valor nominal da tensão medida sobre elemento D_2 .

III.2.3.3 - Operação do Sistema de Empuxo

À partir do posicionamento correto do torquímetro (eixo principal na posição horizontal) e com o conjunto de pás montadas é necessária a zeragem do sistema que é determinada pelo posicionamento relativo das peças do acoplamento ou seja as molas devem ocupar a posição $x = 0$. A tensão correspondente à posição zero é de 1,038 volts D.C. e se a mesma não é obtida desloca-se o acoplamento com as molas relativamente ao eixo do torquímetro, posicionando-se o anteparo móvel de modo adequado em relação ao emissor/foto-resistor.

III.2.3.4 - Leitura e Registro do Sinal do Amplificador de Tensão

O sinal de tensão em D.C. correspondente ao empuxo máximo é de 2,0 volts utilizando-se o amplificador. A leitura deste valor é feita diretamente em um voltímetro e/ou registrada em registrador gráfico. Como alternativa pode-se utilizar o transdutor de deslocamento sem o amplifica-

dor fazendo-se a leitura somente em um voltímetro.

III.2.3.5 - Faixas de Operação

As características das molas são as seguintes:

- Comprimento : 35,0 mm
- Diâmetro externo : 10,5 mm
- Diâmetro do fio : 1,0 mm
- Material : aço SAE 1045
- Número de espiras : 8

Com o conjunto de molas do tipo acima especificado são medidas forças até o valor de 8,50 N. Como a leitura da força de empuxo é dependente do torque transmitido (atrito entre as buchas de teflon e os pinos) a calibração foi realizada até valores de torque de 0,20 N.m.

III.2.4 - Descrição Detalhada do Sistema de Medida de Rotação

O conhecimento da rotação em conjunto com o torque, permite o cálculo da potência fornecida pelo rotor eólico.

III.2.4.1 - Princípio de Funcionamento

A rotação do rotor é medida utilizando-se a propriedade fotoelétrica de um elemento que varia sua resistência elétrica em função da intensidade luminosa incidente. A partir da variação de intensidade sobre o foto-transistor é possível a gera

ção de pulsos que serão diretamente proporcionais à rotação.

Como o elemento de leitura da rotação, o frequencímetro, conta o número de pulsos em um dado intervalo de tempo e conforme se situe o início e final deste intervalo de tempo em relação à ocorrência dos pulsos, o mesmo poderá considerar um pulso a mais ou a menos. Para minimizar estes efeitos é utilizado um disco com 30 furos o que significa que para cada rotação completa do eixo são gerados 30 pulsos.

III.2.4.2 - Esquema Elétrico e Tratamento do Sinal

O sistema é alimentado por uma tensão nominal de 6,0 - 9,0 volts D.C. gerando pulsos com valores de tensão de pico a pico igual a aproximadamente 3,0 volts.

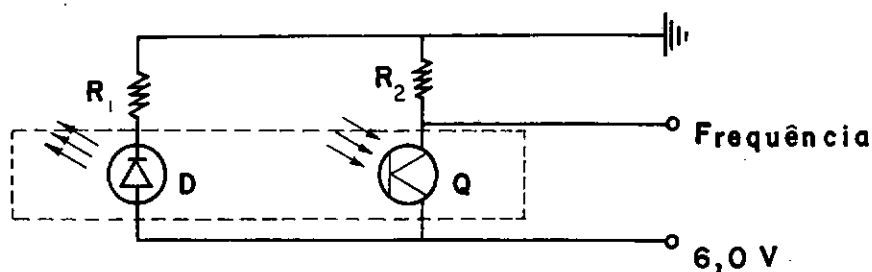


Fig. III.4 - Esquema elétrico

A leitura da rotação é feita diretamente em um frequencímetro, mas o sinal fornecido pelo sistema é inadequado para ser registrado graficamente. Para que isto seja possível é necessário a sua conversão para a forma de tensão contínua, o que é obtido por um circuito eletrônico que converte os sinais em uma onda quadrada e em seguida integrando-a no tempo. A resposta do conjunto será então na forma de tensão D.C. o que permite o seu registro.

III.2.4.3 - Operação do Sistema de Rotação

Não há necessidade de qualquer tipo de zeragem neste sistema sendo a sua operação direta a partir da conexão das fontes de alimentação do sistema de geração de pulsos e do conversor frequência/voltagem.

III.2.4.4 - Leitura e Registro do Sinal

O sinal de tensão em D.C. obtido com o conversor de frequência/voltagem é de no máximo 2,0 volts (2000 Hz) e a leitura deste valor é feita diretamente em um voltímetro e/ou registrada em registrador gráfico. Como alternativa pode-se utilizar um frequencímetro para leitura direta da rotação.

III.2.4.5 - Faixa de Operação

O intervalo de rotação é de 0 - 4000 rpm o que leva à tensão de leitura de 0 - 2,0 volts D.C. utilizando-se o conversor frequência/voltagem.

III.2.5 - Calibração do Torquímetro e Levantamento de Perdas Mecânicas

Com o objetivo de estabelecer a relação entre as solicitações e a respostas foram calibrados os sistemas de torque, empuxo e rotação estabelecendo-se para cada qual a sua precisão.

Além da calibração dos sistemas acima, foram levantadas as perdas mecânicas dos dois mancais do eixo principal.

III.2.5.1 - Tratamento dos Dados das Calibrações

Após a determinação das faixas de operação do torquímetro definiram-se os valores da variável independente para os quais foram levantadas no mínimo cinco valores. Com estes cinco dados é calculado um valor médio e seu desvio padrão pelas Eq. (III.2) e Eq. (III.3).

q_i = variável independente

q_o = variável dependente

n = número de medidas

$$\bar{q}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{0i} \quad (\text{III.2})$$

$$s_{q_0}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_{0i} - \bar{q}_0)^2 \quad (\text{III.3})$$

Portanto para cada ponto de calibração obtem-se um par (q_i, \bar{q}_0) e o desvio padrão relativo à variável dependente. Se o erro na determinação de q_i e q_0 for considerado desprezível e o desvio padrão das médias da mesma ordem de grandeza, pode-se determinar um polinômio de ajuste (mínimos quadrados) que descreverá o comportamento do sistema e calcular o desvio padrão da variável dependente deste polinômio ajustado utilizando-se todos os pontos $(\bar{q}_0) \quad |^{12}|$.

No entanto, quando o medidor estiver sendo utilizado tem-se a situação inversa ou seja, a variável dependente passa a ser a variável independente. Logo:

$$q_0 = f(q_i) - \text{calibração} \quad (\text{III.4})$$

$$q_i = f(q_0) - \text{utilização} \quad (\text{III.5})$$

Para o caso em que o ajuste for uma reta tem-se:

$$q_0 = m q_i + b - \text{calibração} \quad (\text{III.6})$$

$$q_i = \frac{q_0 - b}{m} - \text{utilização} \quad (\text{III.7})$$

É necessário portanto que se definam limites de tolerân

cia para a Eq. (III.7) a partir do cálculo do desvio padrão (S_{q_i}) e da probabilidade de ocorrência desejada. A determinação de S_{q_i} é feita utilizando-se as Eqs. (III.8) e (III.9).

$$q_i' = \frac{\bar{q}_0 - b}{m} \quad (\text{III.8})$$

onde:

\bar{q}_0 = valores médios para os diversos pontos de calibração (q_i)

$$S_{q_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i' - q_i)^2 \text{ ou}$$

$$S_{q_i}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{q}_0 - b}{m} - q_i \right)^2 \quad (\text{III.9})$$

Com o valor de S_{q_i} e fixando-se a probabilidade de ocorrência em 99% determina-se os limites a partir da distribuição t de Student.

Probabilidade de ocorrência = 99% (confiabilidade)

Limite de incerteza = $\pm 2,95 \times S_{q_i}$ (n = 16)

Limite de incerteza = $\pm 2,90 \times S_{q_i}$ (n = 18)

Limite de incerteza = $\pm 2,75 \times S_{q_i}$ (n = 31)

III.2.5.2 - Sistema de Empuxo

A calibração foi feita estaticamente simulando-se o empuxo com forças conhecidas através de massas padrões, executando-se o processo de carga e descarga num total de cinco vezes. Além da aplicação da força simulando o empuxo, o torque transmitido pelo acoplamento também foi aplicado. Para tanto, a calibração foi realizada para cinco valores de torque transmitido que são: 0,00 N.m, 0,05 N.m, 0,10 N.m, 0,15 N.m e 0,20 N.m.

Para valores intermediários do torque são traçadas curvas de torque x empuxo paramétricos para a tensão de leitura (Figura III. 5).

No Apêndice V estão listados os dados de calibração e os polinômios ajustados com seus respectivos índices de correlação.

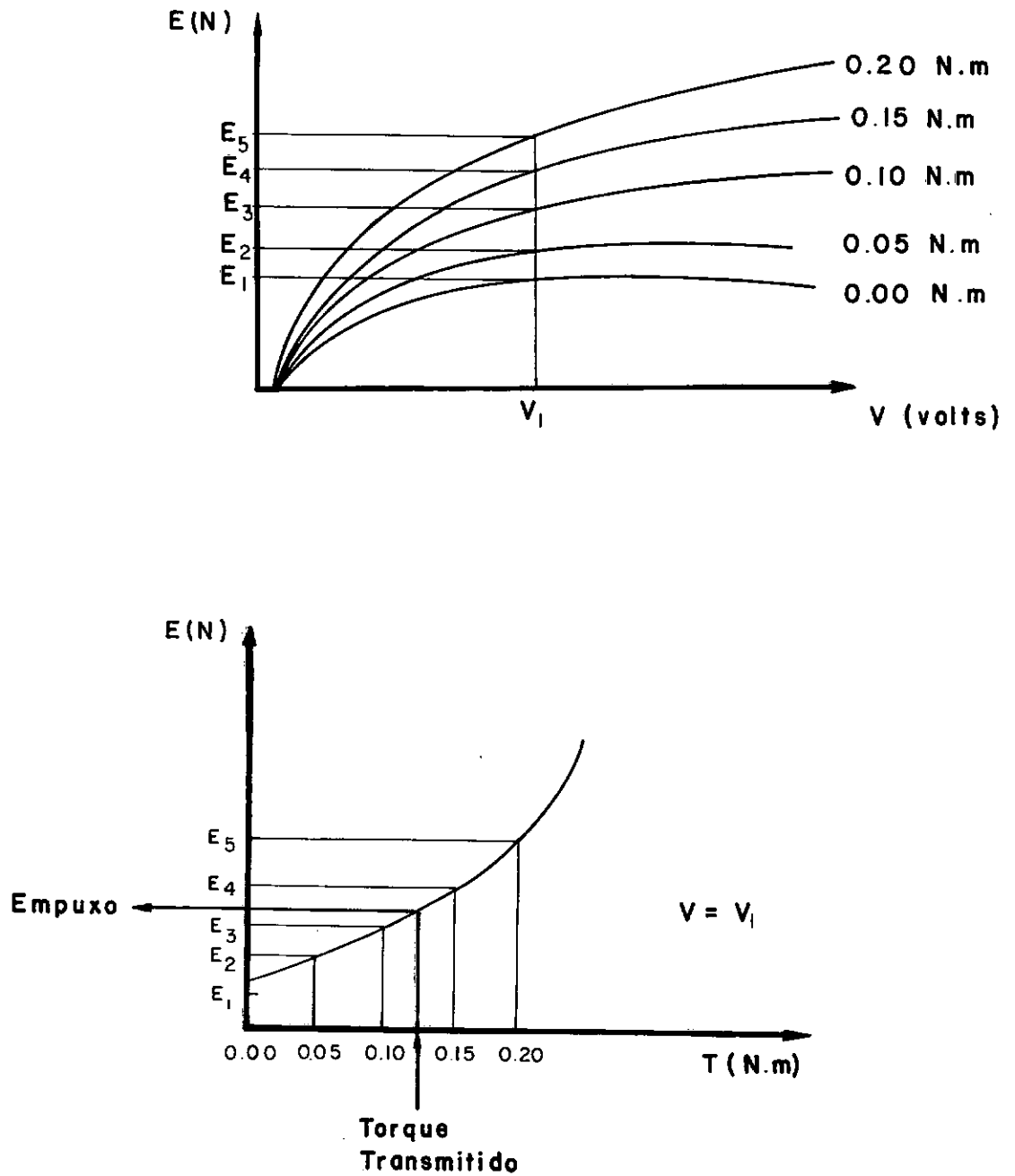


Fig. III.5 - Exemplo determinação empuxo

A partir destes polinômios ajustados são determinadas as equações, desvios padrão e os limites de incerteza do medidor de empuxo. Para os cinco valores de torque transmitido tem-se:

a) $T = 0,00 \text{ N.m}$

$$E(v) = (8,110 \times V - 8,314)^{1/2} \times 2,414 - 1,453 \quad (\text{III.10})$$

Desvio padrão (S_E) = 0,184

Confiabilidade = 99%

Incerteza = $\pm 0,534 \text{ N}$

b) $T = 0,05 \text{ N.m}$

$$E(v) = (8,609 \times V - 8,955)^{1/2} \times 2,274 - 0,881 \quad (\text{III.11})$$

Desvio padrão (S_E) = 0,234

Confiabilidade = 99%

Incerteza = $\pm 0,679 \text{ N}$

c) $T = 0,10 \text{ N.m}$

$$E(v) = (8,230 \times V - 8,524)^{1/2} \times 2,379 - 0,735 \quad (\text{III.12})$$

Desvio padrão (S_E) = 0,138

Confiabilidade = 99%

Incerteza = $\pm 0,400 \text{ N}$

d) $T = 0,15 \text{ N.m}$

$$E(v) = (8,317 \times V - 8,653)^{1/2} \times 2,354 - 0,221 \quad (\text{III.13})$$

Desvio padrão (S_E) = 0,069

Confiabilidade = 99%

Incerteza = $\pm 0,200 \text{ N}$

e) $T = 0,20 \text{ N.m}$

$$E(v) = (8,386 \times V - 8,702)^{1/2} \times 2,334 + 0,278 \quad (\text{III.14})$$

Desvio padrão (S_E) = 0,117

Confiabilidade = 99%

Incerteza = $\pm 0,339 \text{ N}$

Nas cinco equações acima temos:

$E - |N|$ - empuxo

$V - |V|$ - tensão de leitura

Será adotado para o medidor de torque a incerteza máxima para os cinco valores de calibração ou seja:

$$\Delta E = \pm 0,679 \text{ N}$$

III.2.5.3 - Sistema de Torque

A calibração foi executada estaticamente simulando-se a força correspondente ao torque desejado através de massas padrões, executando-se o processo de carga e descarga num total de 10 vezes. A calibração foi realizada aplicando-se a força em dois locais distintos da lâmina flexível (item III.2.5) obtendo-se deste modo dois conjuntos de dados ou seja, para $T \leq 0,25 \text{ N.m}$ e $T \leq 0,50 \text{ N.m}$.

No Apêndice V estão listados os dados de calibração e os polinômios ajustados com seus respectivos índices de correlação.

A partir destes polinômios ajustados são determinados as equações, desvio padrão e os limites de incerteza do medidor de torque. Para as duas faixas de calibração tem-se:

a) $T \leq 0,25 \text{ N.m}$

$$T(v) = 0,146 \times V \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Desvio padrão } (S_T) = 8,64 \times 10^{-4}$$

$$\text{Confiabilidade} = 99\%$$

$$\text{Incerteza} = \pm 2,55 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

b) $T \leq 0,50 \text{ N.m}$

$$T(v) = 0,457 \times V - 0,003 \quad (\text{III.16})$$

$$\text{Desvio padrão } (S_T) = 3,75 \times 10^{-3}$$

$$\text{Confiabilidade} = 99\%$$

$$\text{Incerteza} = \pm 1,1 \times 10^{-2} \text{ N.m}$$

Nas equações acima tem-se:

$T - |\text{N.m}|$ - torque no freio mecânico

$V - |V|$ - tensão de leitura

III.2.5.4 - Sistema de Rotação

O sistema de rotação opera em uma faixa de frequência de 0 - 2000 pulsos/segundo (Hz), e para registro e monitoração utiliza-se um conversor frequência/voltagem o qual foi calibrado levantando-se os dados no total de cinco vezes. A calibração foi realizada utilizando-se um gerador de ondas para a simulação da frequência a qual era monitorada pelo frequencímetro.

No Apêndice V estão listados os dados e o polinômio ajustado com seu respectivo grau de correlação.

Com este polinômio ajustado é determinada a equação, o desvio padrão e os limites de incerteza do conversor frequência/voltagem, e com a Equação (III.17), para faixa de 0 - 2000 Hz, calcula-se a velocidade angular correspondente ao sistema de rotação.

$$w(v) = 216,393 \times V - 8,150 \quad (\text{III.17})$$

Desvio padrão (S_w) = 3,209

Confiabilidade = 99%

Incerteza = $\pm 9,467$ rd/s

Na equação acima tem-se:

w - |rd/s| - velocidade angular

V - |V| - tensão de leitura

III.2.5.5 - Perdas Mecânicas nos Mancais

O levantamento das perdas mecânicas foi obtido registrando-se a curva da velocidade angular x tempo correspondente à desaceleração do conjunto na faixa de 3000 rpm até zero. De um total de cinco testes foram calculadas as médias e com o momento de inércia se calculou o torque resistivo através da Eq. (III.18)

$$T_R(w) = I \cdot \frac{dw}{dt} \quad (\text{III.18})$$

T_R = torque resistivo nos mancais

No Apêndice V estão listadas as médias dos dados de calibração e os polinômios ajustados.

A tentativa de diversas alternativas de ajuste trouxe como melhor solução a divisão dos dados em dois grupos ou seja, $0 \leq t < 60,80$ seg e $60,80 \leq t \leq 127$ seg. No primeiro intervalo é ajustada uma curva exponencial e no segundo uma reta observando-se que a derivada adquire o mesmo valor para o tempo $t = 60,80$ seg.

As equações que descrevem a velocidade angular e a desaceleração são:

a) Velocidade angular (w)

$$w(t) = 314,430 \times e^{-0,015 \times t} \quad (\text{III.19})$$

$$0 \leq t < 60,80 \text{ s}$$

$$\text{Desvio padrão } (S_w) = 1,512$$

$$\text{Confiabilidade} = 99\%$$

$$\text{Incerteza} = \pm 4,158 \text{ rd/s}$$

$$w(t) = 242,133 - 1,896 \times t \quad (\text{III.20})$$

$$60,80 \leq t \leq 127 \text{ s}$$

Desvio padrão (S_w) = 1,119

Confiabilidade = 99%

Incerteza = $\pm 3,077 \text{ rd/s}$

b) Desaceleração angular (\dot{w})

$$\dot{w}(t) = - 4,748 \times e^{-0,015xt} \quad (\text{III.21})$$

$$0 \leq t \leq 60,80 \text{ s}$$

$$\dot{w}(t) = - 1,896 \quad (\text{III.22})$$

$$60,80 \leq t \leq 127 \text{ s}$$

Nas Equações (III.19, III.20, III.21 e III.22) temos:

$$w - |\text{rd/s}|$$

$$t - |s|$$

$$\dot{w} - |\text{rd/s}^2|$$

Com o momento de inércia igual a $I = 3,1265867 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$ determinam-se as equações para o cálculo do torque resistivo em função da rotação

$$T_R = 4,721 \times 10^{-6} \times w \quad (\text{III.23})$$

$$310 \geq w > 125,547 \text{ rd/s}$$

$$T_R = 5,93 \times 10^{-4} \quad (\text{III.24})$$

$$125,547 \geq w \geq 0 \text{ rd/s}$$

Nas Equações (III.23 e III.24) temos:

$$T_R - |\text{N.m}|$$

$$w - |\text{rd/s}|$$

III.2.6 - Determinação das Incertezas

A análise da incerteza do conjunto sistema de medida mais o equipamento de leitura será feita utilizando-se a equação de Kline e McClintock que é apresentada por Holman ^[13] e para uma função F de n variáveis é descrita pela Equação (III.25).

$$F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Δx_n - incerteza da variável x_n

$$\Delta F = \left| \left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n \right)^2 \right|^{1/2} \quad (\text{III.25})$$

III.2.6.1 - Sistema de Torque e Rotação

a) Sistema de torque

a.1) Faixa utilizada : 0,25 N.m

Escala registrador gráfico (ESC) = 1 V ou 2 V

Largura de registro = 250 mm

Leitura do valor registrado : escala milimetrada

Precisão de leitura (ΔX) : 0,5 mm

Precisão do registrador (ΔESC) : 0,001 V - ESC = 1 V

0,002 V - ESC = 2 V

A partir da leitura (X) é possível o cálculo de V com a Equação (III.26) onde:

V - |V|

X - |mm|

ESC = 1 ou 2 V

$$V = \frac{ESC \cdot X}{250} \quad (III.26)$$

A incerteza de V será descrita pela Equação (III.27):

$$\Delta V = \left| \left(\frac{\partial V}{\partial ESC} \cdot \Delta ESC \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial X} \cdot \Delta X \right)^2 \right|^{1/2} \quad (III.27)$$

$$\frac{\partial V}{\partial ESC} = \frac{X}{250}$$

$$\frac{\partial V}{\partial X} = \frac{ESC}{250}$$

$$\Delta V = |1,6 \times 10^{-11} \times X^2 + 4 \times 10^{-6}|^{1/2} \quad (III.28)$$

$$\Delta V = |6,4 \times 10^{-11} \times X^2 + 1,6 \times 10^{-5}|^{1/2} \quad (III.29)$$

As Equações (III.28 e III.29) descrevem a incerteza no valor de V para as escalas de 1 V e 2 V respectivamente, assumindo os seus valores máximos para X = 250 mm. Tem-se então:

$$\Delta V = \pm 0,002 - X = 250 \text{ mm}$$

$$ESC = 1 \text{ V}$$

$$\Delta V = \pm 0,004 - X = 250 \text{ mm}$$

$$ESC = 2 \text{ V}$$

Com a Equação (III.15) para cálculo do torque calcula-se a incerteza decorrente da incerteza de V.

$$T = 0,146 \times V$$

$$\Delta T = \left| \left(\frac{\partial T}{\partial V} \Delta V \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial V} = 0,146$$

$$\Delta T = |(0,146 \cdot \Delta V)^2|^{1/2} \quad (III.30)$$

$$\Delta T = \pm 3,265 \times 10^{-4} \quad ESC = 1 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

$$\Delta T = \pm 0,001 \quad \text{ESC} = 2 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

A calibração do medidor de torque já possui uma incerteza de $\pm 0,003 \text{ N.m}$ e o valor da incerteza global será:

$$\Delta T = \pm 0,003 \text{ N.m} \quad - \text{ESC} = 1 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

$$\Delta T = \pm 0,004 \text{ N.m} \quad - \text{ESC} = 2 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

Será adotada como incerteza global para o sistema de torque ($T \leq 0,25 \text{ N.m}$) os valores máximos acima independentes do valor da leitura X.

Para a faixa de torque ($T \leq 0,50 \text{ N.m}$) o procedimento é análogo chegando-se aos seguintes valores:

$$\Delta T = \pm 0,012 \text{ N.m} \quad - \text{ESC} = 1 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

$$\Delta T = \pm 0,013 \text{ N.m} \quad - \text{ESC} = 2 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

Do mesmo modo será adotada como incerteza global do sistema de torque ($T \leq 0,50 \text{ N.m}$) os valores máximos acima independentes da leitura X.

b) Sistema de Rotação

a.1) Escala registrador gráfico : 1 V e 2 V

Largura de registro : 250 mm

Leitura do valor registrado : escala milimetrada

Precisão de leitura (ΔX) : 0,5 mmPrecisão do registrador (ΔESC) : 0,001 V - ESC = 1 V

0,002 V - ESC = 2 V

A incerteza de V será idêntica aos valores calculados pela Equação (III.27) e terá valores máximos de:

$$\Delta V = \pm 0,002 \quad - \quad X = 250 \text{ mm}$$

$$\text{ESC} = 1 \text{ V}$$

$$\Delta V = \pm 0,004 \quad - \quad X = 250 \text{ mm}$$

$$\text{ESC} = 1 \text{ V}$$

Utilizando a Equação (III.17) calculam-se os limites de incerteza para a velocidade angular com a Equação (III.31):

$$w = 216,393 \times V - 8,150$$

$$\Delta w = \left| \left(\frac{\partial w}{\partial V} \Delta V \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial V} = 216,393$$

$$\Delta w = \left| (216,393 \times \Delta V)^2 \right|^{1/2} \quad (\text{III.31})$$

$$\Delta w = \pm 0,433 \text{ rd/s} \quad - X = 250 \text{ mm}$$

$$\text{ESC} = 1 \text{ V}$$

$$\Delta w = \pm 0,866 \text{ rd/s} \quad - X = 250 \text{ mm}$$

$$\text{ESC} = 2 \text{ V}$$

A calibração do sistema de rotação já possui uma incerteza de $\pm 9,467 \text{ rd/s}$ define-se a incerteza global por:

$$\Delta w = \pm 9,900 \text{ rd/s} \quad - \text{ESC} = 1 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

$$\Delta w = \pm 10,333 \text{ rd/s} \quad - \text{ESC} = 2 \text{ V}$$

$$X = 250 \text{ mm}$$

Será adotado como incerteza global para o sistema de rotação os valores máximos acima independentes do valor da leitura X.

III.2.6.2 - Sistema de Empuxo

Leitura direta em voltímetro

Escala : 20 V

Precisão de leitura (ΔV) = $\pm 0,005 \text{ V}$

As incertezas do valor do empuxo serão descritas por cinco equações decorrentes dos cinco valores de torque de calibração. Com as Equações (III.10, III.11, III.12, III.13 e III.14) e aplicando-se a Equação (III.25) obtem-se os valores

de ΔE . Para $T = 0,00 \text{ N.m}$ tem-se:

$$E = (8,110 \times V - 8,314)^{1/2} \times 2,414 - 1,453$$

$$\Delta E = \left| \left(\frac{\partial E}{\partial V} \cdot \Delta V \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$\frac{\partial E}{\partial V} = 9,789 \times (8,110 \times V - 8,314)^{-1/2}$$

$$\Delta E = |2,4 \times 10^{-3} \times (8,110 V - 8,314)^{-1}|^{1/2} \quad (\text{III.32})$$

Na Equação (III.32) que descreve a incerteza do empuxo observa-se que o valor máximo corresponde ao valor mínimo da tensão de leitura que corresponde ao valor de 0,4 N.

$$\Delta E = \pm 0,069 \text{ (máximo)}$$

A calibração do medidor de empuxo ($T = 0,00 \text{ N.m}$) já possui uma incerteza de $\pm 0,534 \text{ N}$ e o valor da incerteza global será:

$$\Delta E = \pm 0,603 \text{ N}$$

Para os outros valores de torque para os quais o sistema foi calibrado, o procedimento é análogo e os valores estão listados na Tabela (III.1)

TORQUE TRANSMITIDO (N.m)	ΔE (N)
0,00	0,603
0,05	0,787
0,10	0,530
0,15	0,383
0,20	0,690

TABELA III.1 - Limites de incerteza globais

Serã adotada como incerteza global para o medidor de empuxo o limite de $\pm 0,787$ N independente do valor do torque transmitido.

III.2.6.3 - Perdas Mecânicas

O torque resistivo correspondente ao sistema de mancais é descrito pelas Equações (III.23 e III.24). O cálculo da incerteza na determinação do torque é obtido utilizando-se a Equação (III.25).

$$\Delta T = \left| \left(\frac{\partial T}{\partial w} \Delta w \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial w} = 4,721 \times 10^{-6} \quad 310 \geq w > 125,547$$

$$- \frac{\partial T}{\partial w} = 0 \quad 125,547 \geq w \geq 0$$

Determinação da incerteza de T_R em função do ajuste do polinômio

$$\Delta \omega = \pm 4,158 \text{ rd/s}$$

$$\Delta T_R = \pm 1,963 \times 10^{-5} \text{ N.m}$$

Determinação da incerteza de T_R em função de leitura da velocidade angular

$$\Delta \omega = \pm 10,333 \text{ rd/s (máximo)}$$

$$\Delta T_R = \pm 4,878 \times 10^{-5} \text{ N.m}$$

Determinação da incerteza de T em função da soma do torque medido no freio mecânico e o torque resistivo.

$$T = T_1 + T_R$$

T_R = torque resistivo

T_1 = torque medido no freio mecânico

$$\Delta T = \left| \left(\frac{\partial T}{\partial T_1} \cdot \Delta T_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial T_R} \cdot \Delta T_R \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial T_1} = \frac{\partial T}{\partial T_R} = 1$$

$$\Delta T_1 = \pm 0,013 \text{ N.m}$$

$$\Delta T_R = \pm 6,841 \times 10^{-5} \text{ N.m (incerteza global de } T_R)$$

$$\Delta T = \pm 0,013 \text{ N.m}$$

A relação entre $\Delta T_I / \Delta T_R$ é de 190 vezes sendo deste modo, a incerteza do torque total igual $\pm 0,013$ N.m para a faixa $T \leq 0,50$ N.m e $\pm 0,004$ N.m para a faixa de $T \leq 0,25$ N.m. Na Tabela (III.2) estão descritas as características do tórquímetro LMF-A2.

III.2.7 - Equipamentos Periféricos

Para a operação do sistema de medidas são utilizados um conjunto de equipamentos auxiliares para alimentação, monitoração e registro dos medidores de torque, rotação e empuxo. São eles:

- Fonte regulada 01 e 02

Fabricante: LABO

Modelo: 2025

Saída tensão: 0 - 30 V

Máxima corrente: 1,5 A

Regulação de carga: menos que 20 mV de flutuação em 30 V - 1,5A

Regulação de linha: menos que 10 mV na saída em 30 V - 1,5 A

para tensão de entrada variando de $\pm 10\%$

do valor nominal

Ondulação e ruído: 3 mV rms

Temperatura utilização: 0 - 50°C

Utilização: Sistema de rotação e conversor frequência/voltagem respectivamente

- Fonte regulada 03

Fabricante: LABO

Modelo: 2130

Saída de tensão: 0 - 25 V

Máxima corrente: 5,0 A

Regulação de carga: menos que 30 mV de flutuação em 25 V - 5 A

Regulação de linha: 10 mV na saída em 25 V - 5 A para tensão de entrada variando de $\pm 10\%$ do valor nominal

Ondulação e ruído: menor que 5 mVrms

Temperatura utilização: 0 - 50°C

Utilização: Sistema de empuxo

- Amplificador dinâmico

Fabricante: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A. - IPT

Número de canais: 02

Fundo de escala: 5000 μ strain para um sinal de saída igual a 5,0 volts com vernier na posição zero

Sensibilidade máxima: 1 mV por 1×10^{-6} strain

Saída tensão: 5,0 volts máxima

Saída corrente: 15,0 mA máxima

Especificação da ponte: ...

a) Resistência do extensômetro elétrico: 120 Ω

b) Alimentação da ponte:

Canal 1: 2,57 volts

Canal 2: 2,42 volts

c) Gage factor: 2,00

Linearidade: $\pm 1\%$ para fundo de escala

Resposta de frequência: DC = 30 Hz

Drift: 1 mV/h (15 minutos após ligar o aparelho)

Utilização: Sistema de torque

- Multímetro digital

Fabricante: ECB - Equipamentos Científicos do Brasil

Modelo: MDA - 200

Escala: 0 - 20 V

Precisão: 0,02% do fundo de escala mais 0,04% da leitura

Resolução: 10 μ V para escala de 200 mV

Temperatura de operação: 0 - 50°C

Impedância de entrada: 10,1 M Ω $\pm 1\%$

Utilização: Sistema de empuxo

- Voltímetro digital

Fabricante: ECB - Equipamentos Científicos do Brasil

Modelo: MD-045

Escala: 0-20V

Precisão: $\pm 0,005\%$ da escala ± 1 dígito

Temperatura operação: 0 - 40°C

Impedância entrada: 10⁹ Ω

Utilização: Sistema de torque

- Frequencímetro digital

Fabricante: Leader Instruments Corp.

Modelo: LDC-821

Faixa operação: 10 Hz - 15 MHz

Tempo de contagem: 1 mS, 10 mS, 100 mS e 1 S

Resolução: 1 kHz, 100 Hz, 10 Hz e 1 Hz

Precisão: ± 1 pulso \pm precisão do tempo de contagem

- Registrador potenciométrico

Fabricante: ECB - Equipamentos Científicos do Brasil

Modelo: RB 103

Número de canais: 03

Largura registro: 250 mm

Sistema de registro: servomotor de corrente alternada

Tempo de resposta: < 1 seg. para deflexão total

Faixa de medição utilizadas: 1,0 V e 2,0 V

Precisão do divisor: $\pm 0,1\%$

Linearidade: $\pm 0,1\%$

Sensibilidade: $\pm 0,1\%$ da faixa selecionada

Ajuste "zero": 100% da faixa

Impedância entrada: potenciométrica até 500 mV; 1 M Ω constante para 1,0 V e 2,0 V

Velocidade de arraste do papel utilizado: 60 cm/min

Precisão do arraste: frequência da rede

Utilização: Sistema de torque e rotação

- Tubo de Prandtl

Fabricante: United Sensor & Control Corp.

Modelo: PBC-24 - G - 22 - KL

Diâmetro do sensor: 1/8"

Comprimento do tubo: 24"

Utilização: medida velocidade do vento

TORQUÍMETRO LMF-A2					
MEDIDA	FAIXA UTILIZAÇÃO	INCERTEZA	PRECISÃO(*) (%)	EQUAÇÃO CÁLCULO	LEITURA
Torque	0 - 0,25 N.m 0 - 0,50 N.m	$\pm 0,004$ N.m $\pm 0,013$ N.m	$\pm 1,6$ $\pm 2,6$	$T=0,146 \times V + T_R$ $T=0,457 \times V - 0,003 + T_R$	Registrador gráfico ESC = 2V
Empuxo	0,4 - 8,5 N	$\pm 0,787$ N	$\pm 9,3$	$E_1 = (47,260 \times V - 48,449)^{1/2} - 1,453$ $T_T = 0,00$ N.m $E_2 = (44,518 \times V - 46,307)^{1/2} - 0,881$ $T_T = 0,05$ N.m $E_3 = (46,579 \times V - 48,243)^{1/2} - 0,735$ $T_T = 0,10$ N.m $E_4 = (46,087 \times V - 47,949)^{1/2} - 0,221$ $T_T = 0,15$ N.m $E_5 = (45,683 \times V - 47,405)^{1/2} - 0,278$ $T_T = 0,20$ N.m	Voltímetro digital ESC=20 V
Rotação	0 - 4000 rpm	$\pm 10,333$ rd/s	$\pm 2,5$	$W = 216,393 \times V - 8,150$	Registrador gráfico ESC=2V
*precisão=incerteza/ fundo escala			$T_R = 4,721 \times 10^{-6} \times W$ $W > 125,547$ rd/s $T_R = 5,93 \times 10^{-4}$ $W \leq 125,547$ rd/s	T_T - torque transmitido no acoplamento	

TABELA III.2 - Características do torquímetro LMF-A2

III.3 - PÃS DO MODELO REDUZIDO

III.3.1 - Concepção Estrutural e Material Utilizado

Foi utilizado um eixo de aço prata de 3 mm de diâmetro em torno do qual é executado o perfil aerodinâmico (Figura III.6) à partir de madeira balsa utilizada em aeromodelismo e, no acabamento superficial foi utilizado DOP que permitiu a redução considerável na rugosidade relativa. A fixação das pás ao bosso é feita através do eixo de 3 mm.

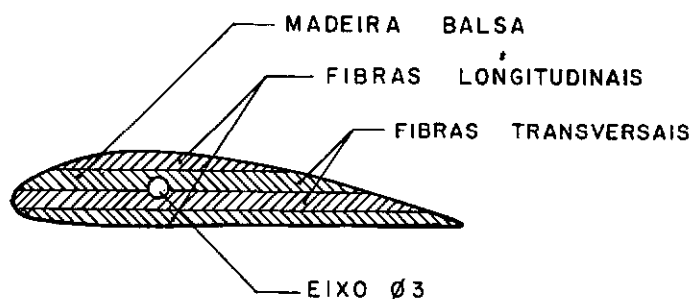


Fig. III.6 - Perfil GÖ 624 em madeira balsa

III.3.2 - Execução da Pás

Em torno do eixo de aço prata, foram colocadas lâminas de balsa até que se obtivesse uma espessura maior que a espessura máxima do perfil para aquela corda.

Para controle da forma do perfil das pás foram confeccionadas gabaritos de acrílico abrangendo a região côncava do perfil (Figura III.7).

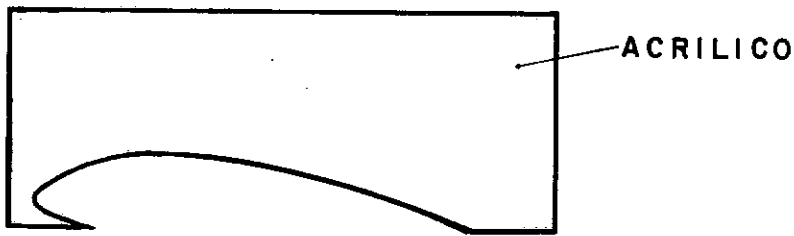


Fig. III.7 - Gabarito das pás

A partir do gabarito, do eixo com a madeira balsa e de uma superfície plana o perfil era executado utilizando-se lixas de madeira.

O balanceamento das pás foi estático com auxílio de uma balança através da qual se obteve o mesmo peso para o conjunto de 03 pás de mesma corda. Este procedimento foi satisfatório não se constatando nenhum problema na operação dos rotores no túnel de vento.

Para garantir uma transição de escoamento laminar para o turbulento foi utilizado um estimulador de turbulência modificando-se a rugosidade do perfil na região superior, entre bordo de ataque e a espessura máxima do perfil, em virtude do baixo número de Reynolds que pode ser obtido no Túnel de Vento II. A execução de modelos com dimensões maiores resolveria este problema, no entanto traria problemas relacionado com o bloqueio sólido e de esteira. A alteração da rugosidade foi feita utilizando papel para recobrimento de asas de aeromodelismo e para que o perfil sofresse a mínima alteração de forma, o mesmo foi fixado com DOP. A relação entre a região com a rugosidade alterada

e a corda do perfil foi de $x/c = 0,30$.

Nos testes realizados por Kafuri ^[16] nas instalações do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica, o acréscimo médio verificado foi da ordem de 3% para o coeficiente de potência.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

IV.1 - PREPARAÇÃO DO CONJUNTO EXPERIMENTAL

Para levantamento dos dados experimentais são necessários procedimentos preliminares referentes a:

- túnel de vento II
- medição da velocidade do vento
- montagem do conjunto de pás
- conexão dos conversores auxiliares para registro de variáveis
- conexão do registrador gráfico
- conexão da bancada de instrumentos periféricos

Com os cuidados descritos a seguir são evitados erros sistemáticos que eventualmente poderiam ocorrer em relação a um conjunto de testes de um rotor eólico.

IV.1.1 - Túnel de Vento II

Em virtude do túnel de vento ser do tipo aberto e das condições locais adversas é comum ocorrer a obstrução da tela alterando a velocidade máxima e a uniformidade do escoamento na seção de testes, o que obriga que se verifique o estado da mes-

ma e se necessário remover a sujeira antes de cada conjunto de testes.

IV.1.2 - Medição da Velocidade do Vento

Na medição da velocidade do vento com o tubo de Prandtl são tomados cuidados com a sua posição, Calache $|^{1^0}|$, e o seu alinhamento em relação ao escoamento ($\pm 5^0$).

IV.1.3 - Montagem do Conjunto de Pás

Com a utilização do gabarito de montagem, o conjunto de pás é fixado de acordo com o ângulo θ desejado (Apêndice IV - Fotografia 02).

IV.1.4 - Conexão dos Conversores, Registrador Gráfico e Instrumentos Periféricos

Este conjunto de equipamentos está montado em uma banca da na qual as conexões básicas já estão feitas e, portanto o cuidado é em relação ao valor de tensão nas fontes de alimentação, zeragem dos medidores, registrador gráfico e aterramento dos instrumentos (Apêndice IV - Fotografia 08).

IV.2 - LEVANTAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Antes de se iniciar a medição de dados experimentais, uma série de testes e acertos de ordem prática foram realizados

em virtude de se tratar de um equipamento pioneiro desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica. A partir desta experiência prática foram determinados o tempo de registro dos dados, número de testes para cada rotor eólico, número de pontos experimentais mínimos ou seja, todas as condições necessárias para se obter as curvas de desempenho do melhor modo possível (V.2).

IV.2.1 - Velocidade do Vento na Seção de Testes

Apesar da posição do tubo de Prandtl (1 m à montante) em relação ao rotor eólico, observou-se que durante o teste dos conjuntos de pás ocorria uma variação da velocidade do vento na medida em que a potência extraída aumentava. Tal fato é, possivelmente ocasionado pela alta relação área frontal varrida do modelo reduzido/área do túnel que conduz à uma variação no bloqueio oriunda da expansão da esteira em função do carregamento do rotor o que teoricamente é esperado. Para tanto, eram realizadas no mínimo três à quatro leituras da velocidade do vento registrando-se sempre o valor de duas condições limites que correspondem ao rotor à plena rotação sem carga e ao rotor com velocidade angular zero. Os outros pontos são registrados entre estes dois extremos à partir da sensibilidade do operador sendo o número de pontos variável em função da geometria do rotor eólico.

O registro da velocidade do vento de modo contínuo no registrador gráfico foi realizado com o auxílio de um micromano

metro. Os resultados obtidos foram comparados ao procedimento experimental adotado e se observou que a utilização deste equipamento não trouxe nenhuma melhora significativa que justificasse o seu uso sendo a adimensionalização dos resultados muito próxima não se podendo afirmar a maior eficácia de um ou de outro método.

IV.2.2 - Medidas de Torque, Empuxo e Rotação

O procedimento experimental para levantamento destas variáveis foi de dois modos distintos em função do procedimento experimental adotado.

IV.2.2.1 - Medidas de Torque, Empuxo e Rotação para o Lado Esquerdo da Curva de $T \times w$ (Item II.4)

De acordo com a concepção do torquímetro não é possível a obtenção dos valores das variáveis que representam o desempenho do rotor eólico. Para tanto se utilizou um artifício ou seja, a curva de aceleração do rotor eólico que é obtida a partir do registro da velocidade angular em função do tempo.

A montagem do torquímetro é alterada retirando-se todo o conjunto do freio mecânico a partir do acoplamento para medida do empuxo inclusive, mantendo-se somente o sistema para medida da rotação.

Experimentalmente o procedimento é muito simples considerando-se que o rotor é mantido com velocidade angular igual a zero e o túnel de vento na condição normal de operação (velocidade máxima). Com estas condições iniciais, o rotor é liberado atingindo a velocidade angular máxima registrando-se graficamente esta curva. A velocidade do túnel de vento não apresentou nenhuma variação entre estas duas condições extremas certamente porque o rotor está acelerando em vazio.

A velocidade linear do registrador gráfico, que gera a escala de tempo, foi de 60 cm/min. e para cada configuração geométrica dos rotores eólicos foram levantadas duas curvas de velocidade angular x tempo.

IV.2.2.2 - Medidas de Torque, Empuxo e Rotação para o Lado Direito da Curva $T \times w$ (Item II.4)

A obtenção dos dados experimentais nestas condições de operação foi realizada utilizando-se o freio mecânico ou seja, a partir da condição de velocidade angular máxima o torque resistivo é aumentado gradativamente varrendo-se a faixa de razão de velocidade até se atingir a condição de $dT/dw = 0$.

O torque e a rotação são registrados graficamente durante um tempo de 4 a 5 segundos para cada condição de estabilidade que é obtida após um período de aproximadamente 10-15 segundos decorrentes da mudança na condição de operação do torqueímetro (aumento ou diminuição do torque resistivo). No entanto,

a observação do comportamento das penas do registrador gráfico, a indicação nos monitores digitais e a sensibilidade do operador são mais do que suficientes para avaliar quando o registro dos dados pode ser feito. Outrossim, caso ocorresse qualquer problema de instabilidade durante o ponto que estava sendo registrado o mesmo pode ser imediatamente repetido abandonando-se o registro anterior.

A leitura do empuxo foi feita em um multímetro digital nos mesmos instantes em que eram levantados os registros do torque e rotação.

Para descrever esta região da operação do rotor eólico foram realizados dois testes obtendo-se uma média de 10 a 20 pares distintos de torque x rotação e empuxo x rotação.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

V.1 - TIPO DE DADOS EXPERIMENTAIS

A obtenção dos dados experimentais foi realizada de dois modos distintos o que conduz a dois métodos de tratamento dos valores pois em uma das condições obtemos diretamente a curva torque x velocidade angular e na outra situação obtemos a curva velocidade angular x tempo através da qual indiretamente chega-se a curva de torque x velocidade angular.

V.2 - DADOS DIRETOS

V.2.1 - Velocidade do Vento

Com um tubo de Prandtl e um manômetro de Betz são obtidos os valores de Δh em mm H_2O . A partir dos n valores de Δh , para uma determinada configuração geométrica, é calculada a média aritmética obtendo-se um valor de Δh_m

$$\Delta h_m = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n}{n}$$

Com o valor de Δh_m , a pressão atmosférica, a temperatura ambiente calcula-se o valor da velocidade do vento (Apêndice III). Sobre este valor são aplicados os fatores de bloqueio sólido e de esteira correspondentes para cada configuração (Apêndice II).

V.2.2 - Rotação e Torque

A rotação e torque são registrados graficamente de modo que para cada ponto experimental é obtido um intervalo de monitoramento e para o qual são feitas quatro leituras de modo sistemático obtendo-se portanto, quatro valores de torque e rotação. Com os quatro valores são obtidas as médias que irão representar este ponto experimental e, para um teste representado por 20 pontos, foram feitas um total de 80 leituras.

A leitura de torque e rotação são em tensão D.C. e com as equações de calibração obtém-se os valores correspondentes em N.m e rd/s (item III.2.5.4 e III.2.5.3). Ao torque registrado é somando o torque resistivo dos dois mancais para os quais foi levantada a curva de calibração (item III.2.5.5).

V.2.3 - Empuxo

O empuxo é lido diretamente com um multímetro que possui um recurso que permite a retenção de um valor no instante desejado, pressionando-se para isto uma tecla de memória. Durante o período de 4 a 5 segundos de registro do torque e rotação é então lido um valor para o empuxo. Com este valor em D.C. e o torque transmitido no acoplamento obtém-se o valor do empuxo em N através das curvas de calibração (item III.2.5.2).

V.2.4 - Cálculo dos Coeficientes Adimensionais

Com o valor da velocidade do vento corrigida, o torque, o empuxo e a rotação são calculados os coeficientes de potência, torque, empuxo, razão de velocidade e número de Reynolds.

V.2.4.1 - Determinação da Incerteza no Valor da Potência

A potência fornecida pelo rotor eólico é calculada pela Equação (V.1)

$$P. = T \cdot w \quad (V.1)$$

A incerteza no cálculo do valor da potência é definida pela equação (V.2 e V.3)

$$\Delta P = \left| \left(\frac{\partial P}{\partial T} \cdot \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial w} \Delta w \right)^2 \right|^{1/2} \quad (V.2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial T} = w \quad \begin{aligned} \Delta T &= \pm 0,004 \cdot N.m \quad (T \leq 0,25 \text{ N.m}) \\ \Delta T &= \pm 0,013 \text{ N.m} \quad (T \leq 0,50 \text{ N.m}) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P}{\partial w} = T \quad \Delta w = \pm 10,333 \text{ rd/s}$$

Para a família em estudo o torque transmitido é $\leq 0,25$ N.m, logo a incerteza no valor de P:

$$\Delta P = |1,6 \times 10^{-5} \times w^2 + 106,792 \times T^2|^{1/2} \quad (V.3)$$

V.2.4.2 - Determinação da Incerteza no Valor da Razão de Velocidade

A vazão de velocidade é calculada pela Equação (V.4)

$$RV = \frac{w \cdot R}{V} \quad (V.4)$$

A incerteza no cálculo do valor da razão de velocidade é definida pela Equação (V.5 e V.6)

$$\Delta RV = \left| \left(\frac{\partial RV}{\partial V} \cdot \Delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial RV}{\partial w} \cdot \Delta w \right)^2 \right|^{1/2} \quad (V.5)$$

$$\frac{\partial RV}{\partial V} = - \frac{w \cdot R}{V^2} \quad \Delta V = \pm 0,167 \text{ (Apêndice III)}$$

$$\frac{\partial RV}{\partial w} = \frac{R}{V} \quad \Delta w = \pm 10,333 \text{ rd/s}$$

$$\Delta RV = \left| \frac{RV^2}{V^2} \cdot 0,028 + \frac{5,405}{V^2} \right|^{1/2} \quad (V.6)$$

V.2.4.3 - Determinação da Incerteza no Valor do Coeficiente de Potência, Torque e Empuxo

Os três coeficientes adimensionais são definidos pelas Equações (V.7, V.8 e V.9)

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_v \cdot V^3} \quad (V.7)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{4} \rho V^2 \cdot A_v \cdot D} \quad (V.8)$$

$$C_E = \frac{E}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_v \cdot V^2} \quad (V.9)$$

a) Cálculo da incerteza no valor de C_p

$$\Delta C_p = \left| \left(\frac{\partial C_p}{\partial P} \cdot \Delta P \right)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial V} \cdot \Delta V \right)^2 \right|^{1/2} \quad (V.10)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial P} = \frac{2}{\rho A_v \cdot V^3}$$

ΔP é descrito pela Equação (V.3)

$$\frac{\partial C_p}{\partial \rho} = \frac{-2 P}{\rho^2 \cdot A_v \cdot V^3} \quad \Delta \rho = \pm 0,001$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial V} = \frac{-6 P}{\rho A_v \cdot V^4} \quad \Delta V = \pm 0,167$$

Substituindo o valor das incertezas e derivadas parciais para valores de V , ρ e P determina-se a incerteza para o valor de C_p .

b) Cálculo da incerteza no valor de C_T

$$\Delta C_T = \left| \left(\frac{\partial C_T}{\partial T} \cdot \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial V} \cdot \Delta V \right)^2 \right|^{1/2} \quad (V.12)$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial T} = \frac{4}{\rho \cdot V^2 \cdot A_V \cdot D} \quad \Delta T = \pm 0,004$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial \rho} = \frac{-4 \cdot T}{\rho^2 \cdot V^2 \cdot A_V \cdot D} \quad \Delta \rho = \pm 0,001$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial V} = \frac{-8 \cdot T}{\rho^2 \cdot V^3 \cdot A_V \cdot D} \quad \Delta V = \pm 0,167$$

Substituindo o valor das incertezas e derivadas parciais para valores de V , ρ e T determina-se a incerteza para o valor de C_T .

c) Cálculo da incerteza no valor de C_E

$$\Delta C_E = \left| \left(\frac{\partial C_E}{\partial E} \cdot \Delta E \right)^2 + \left(\frac{\partial C_E}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial C_E}{\partial V} \cdot \Delta V \right)^2 \right|^{1/2} \quad (V.13)$$

$$\frac{\partial C_E}{\partial E} = \frac{2}{\rho \cdot A_V \cdot V^2} \quad \Delta E = \pm 0,787$$

$$\frac{\partial C_E}{\partial \rho} = \frac{-2 \cdot E}{\rho^2 \cdot A_V \cdot V^2} \quad \Delta \rho = \pm 0,001$$

$$\frac{\partial C_E}{\partial V} = \frac{-4 \cdot E}{\rho \cdot A_V \cdot V^3} \quad \Delta V = \pm 0,167$$

Substituindo o valor das incertezas e das derivadas parciais para valores de V , ρ e E determina-se a incerteza para o valor de C_E .

V.2.5 - Ajuste de Curvas aos Dados Experimentais

Aos dados calculados são ajustados polinômios pelo método dos mínimos quadrados utilizando-se um programa desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica.

V.3 - DADOS INDIRETOS

Com a determinação da curva aceleração angular (\dot{w}) x velocidade angular (w) obtém-se a curva de torque x velocidade angular com a Equação (V-16)

$$T(w) = I \cdot \dot{w}(w) + T_R(w) \quad (V.16)$$

A partir da Equação (V.8) determina-se o coeficiente de torque (C_T) e como a determinação da curva de aceleração não permite que se descreva exatamente o comportamento do rotor eólico, em virtude do mesmo estar acelerando e o cálculo de I não ser exato, se utiliza um coeficiente de correção definido por:

$C_T(RV)$ - coeficiente de torque a partir de dados medidos

$C_T^i(RV)$ - coeficiente de torque calculado indiretamente

$$FC = \frac{C_T^i(RV)}{C_T(RV)}$$

Este coeficiente é calculado para três valores de RV e utiliza-se o valor médio para correção da curva $C_T^i \times RV$. Com a curva corrigida é traçado o lado esquerdo mantendo-se o lado direito inalterado.

A representação gráfica desta região será tracejada ser vindo apenas como indicação do comportamento do rotor eólico.

V.4 - DADOS EXPERIMENTAIS

V.4.1 - Exemplo do Registro de Dados

As variáveis torque e rotação são registradas graficamente e a sua forma, oscilações podem ser observadas na Figura V.1. na qual encontram-se dois períodos de registro de dados.

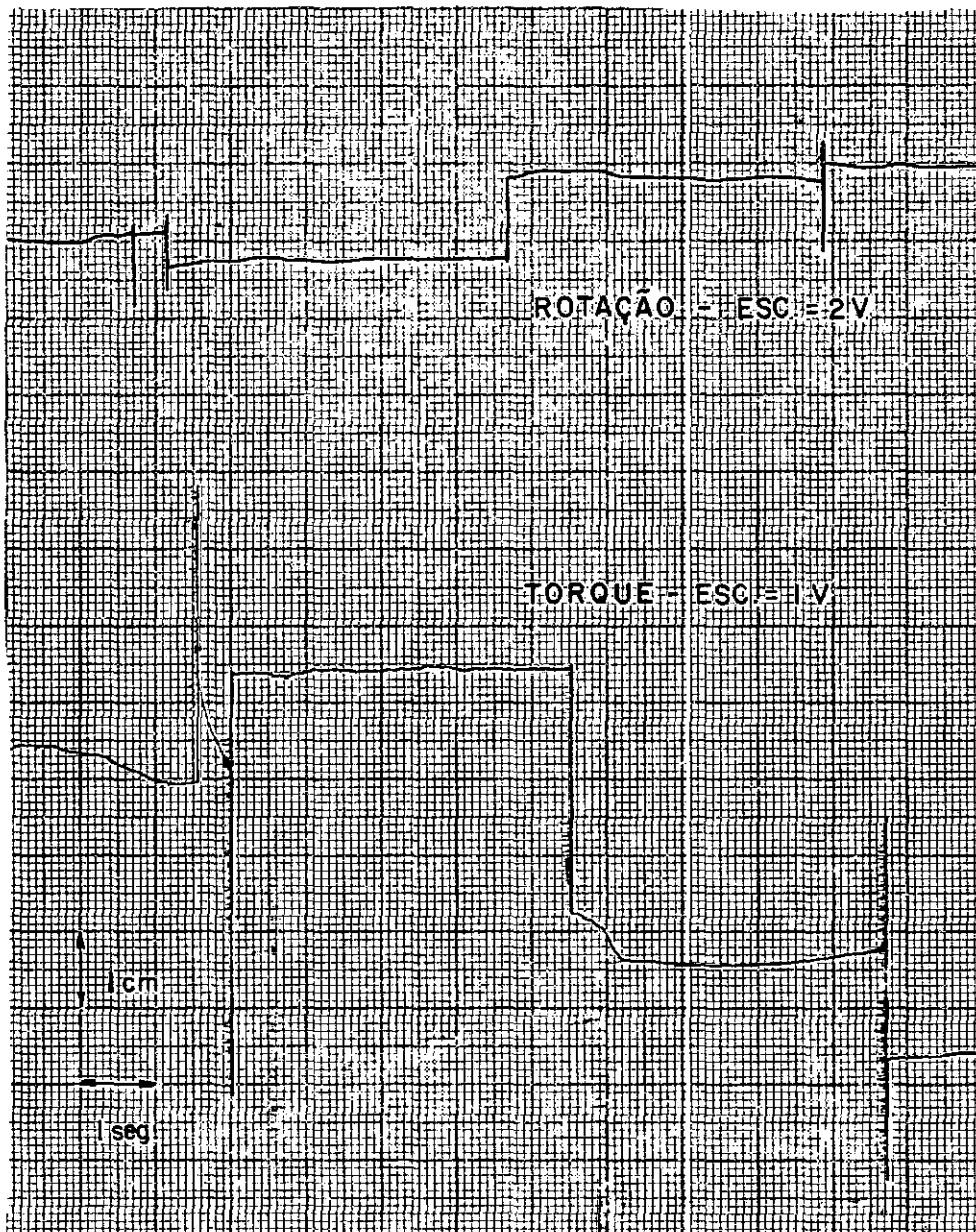


Fig. V.1 - Registro de dados

V.4.2 - Dados de Coeficiente de Potência x Razão de Velocidade

Os dados medidos e seus respectivos polinômios de ajuste estão no Apêndice VI, item A.VI.1. Para os coeficientes listados na Tabela A.VI.1 obtém-se o valor de $100.C_p$ para os diversos valores RV.

V.4.3 - Dados de Coeficiente de Torque x Razão de Velocidade

De modo idêntico ao coeficiente de potência, os valores medidos estão listados no Apêndice VI, item A.VI.2 e para os coeficientes listados na Tabela A.VI.2 obtém-se o valor de $100.C_T$ para os diversos valores de RV.

V.4.4 - Dados de Coeficiente de Empuxo x Razão de Velocidade

O coeficiente de empuxo s_0 é obtido para a condição de valores medidos, estando os mesmos listados no Apêndice VI, item A.VI.3 e para os coeficientes listados na Tabela A.VI.3 obtém-se o valor de $100.C_E$ para os diversos valores de RV.

V.5 - CURVAS AJUSTADAS

Para os valores medidos e indiretos foram ajustados polinômios que permitem a determinação de qualquer ponto através de cálculos sem a necessidade de leituras nos gráficos correspondentes.

No entanto, no Apêndice VI, item A.VI.4 encontram-se traçados o conjunto de curvas de $C_p \times RV$, $C_T \times RV$ e $C_E \times RV$ para a família "A", pois a partir das mesmas é possível uma análise rápida do comportamento de determinada configuração.

V.6 - INCERTEZA NOS VALORES DOS COEFICIENTES DE POTÊNCIA, TORQUE E EMPUXO

Além da incerteza calculada para os coeficientes adimensionais no item V.2.4.3 é necessário considerar-se a incerteza oriunda do ajuste do polinômio aos dados experimentais e a incerteza no valor da razão de velocidade. Na Figura V.2 estão representadas as incertezas oriundas do ajuste e da razão de velocidade.

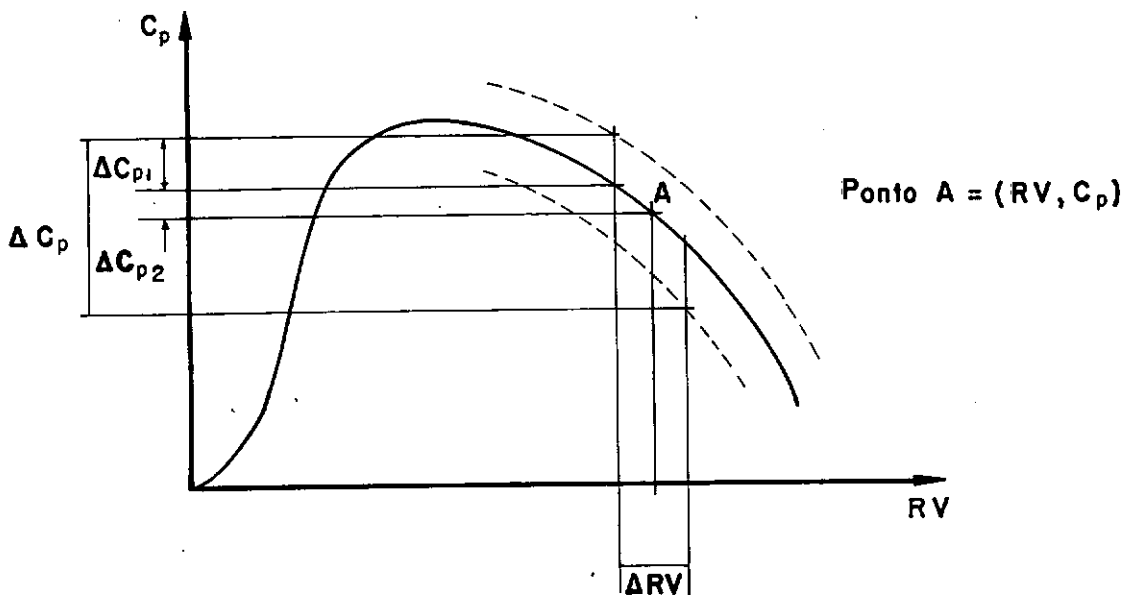


Fig. V.2 - Composição das incertezas do ajuste e RV

A incerteza parcial de ΔC_p é composta de duas incertezas definidas por:

a) Utilizando a equação de Kline e McClintock

$$\Delta C_{p_1} = \left| \left(\frac{\partial C_p}{\partial RV} \cdot \Delta RV \right)^2 \right|^{1/2}$$

b) Limite de incerteza devido ao ajuste do polinômio

$$\Delta C_{p_2} = |t \cdot S(C_p)|,$$

onde t é obtido da distribuição de Student em função da confiabilidade desejada e $S(C_p)$ é o desvio padrão do ajuste do polinômio. A estes dois valores parciais deverá ser adicionada a incerteza oriunda do cálculo de C_p . Este valor será adicionado aos extremos determinados nos itens (a) e (b) o que conduz a um valor final conservador. Para o rotor helicóptico A.3.25.2031 foram calculados estes extremos para alguns pontos, com os quais é possível a análise da incerteza final nos resultados gerados.

- Incerteza do ajuste

$$\Delta C_{p_1} = \pm 0,011$$

Confiabilidade = 99%

- Incerteza em virtude de RV

Incerteza em RV

$$RV = 3,2784 \quad \Delta RV = \pm 0,241$$

$$RV = 3,3593 \quad \Delta RV = \pm 0,242$$

$$RV = 2,8882 \quad \Delta RV = \pm 0,240$$

Cálculo de ΔC_{p_2}

$$\frac{\partial C_p}{\partial RV} = -0,010 \times RV^2 - 0,077 \times RV + 0,267$$

$$RV = 3,2784 \quad \Delta C_{p_2} = \pm 0,022$$

$$RV = 3,3593 \quad \Delta C_{p_2} = \pm 0,025$$

$$RV = 2,8882 \quad \Delta C_{p_2} = \pm 0,009$$

- Incerteza no cálculo de C_p

$$RV = 3,2794 \quad \Delta P = \pm 1,539$$

$$RV = 3,3593 \quad \Delta P = \pm 1,521$$

$$RV = 2,8882 \quad \Delta P = \pm 1,912$$

Cálculo de ΔC_{p_3}

$$\Delta C_p = \left| \left(\frac{\partial C_p}{\partial P} \cdot \Delta P \right)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial C_p}{\partial V} \cdot \Delta V \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho AV^3}$$

$$\begin{array}{ll}
 RV = 3,2784 & \Delta C_{p_3} = \pm 0,015 \\
 RV = 3,3593 & \Delta C_{p_3} = \pm 0,015 \\
 RV = 2,8882 & \Delta C_{p_3} = \pm 0,018
 \end{array}$$

Somando-se os três valores de ΔC_p adota-se um procedimento conservador que conduz à seguinte precisão:

RV	C_p	ΔC_p	%
3,3593	0,2258	$\pm 0,051$	$\pm 22,6$
3,2784	0,2244	$\pm 0,048$	$\pm 21,4$
2,8882	0,2554	$\pm 0,038$	$\pm 14,8$

RV	A	B	C
3,3593	$\pm 4,9$	$\pm 9,7$	$\pm 6,6$
3,2784	$\pm 4,9$	$\pm 11,1$	$\pm 6,7$
2,8882	$\pm 4,3$	$\pm 3,5$	$\pm 7,0$

$$A = C_p / \Delta C_{p_1} \quad B = C_p / \Delta C_{p_2} \quad C = C_p / \Delta C_{p_3}$$

Se ao invés do procedimento de determinação da incerteza global anterior, for utilizado o conceito de erro médio quadrático definido pela Eq. V.14 temos:

$$\Delta C_p = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^3 (\Delta C_{p_n})^2 \right|^{1/2} \quad (V.14)$$

Para os mesmos valores de RV obtem-se a seguinte precisão:

RV	C_p	ΔC_p	%
3,3593	0,2258	$\pm 0,017$	$\pm 7,5$
2,2784	0,2244	$\pm 0,018$	$\pm 8,0$
2,8882	0,2554	$\pm 0,013$	$\pm 5,1$

V.7 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

V.7.1 - Eficiência dos Rotores Eólicos

O rotor eólico mais eficiente (A.3.10.2031) chegou a um valor 36,9% o que pode ser considerado bastante satisfatório em virtude das características de simplicidade da família. No entanto, é importante ressaltar que a análise da eficiência de um sistema eólico só é válida, quando se faz o casamento rotor eólico/carga e condições de vento como um todo.

V.7.2 - Solidez e Número de Reynolds

A característica básica dos rotores eólicos tipo hélice está na sua alta rotação e baixa solidez. A solidez do rotor eólico mais eficiente não é considerada baixa ($\sigma = 0,2031$), o que normalmente conduz a valores menores de C_p . No entanto, analisando-se a tabela dos coeficientes de sustentação e arrasto e o número de Reynolds para os modelos reduzidos observa-se que entre todos os rotores da família o de número A.3.10.2031 é o que opera sob condições de velocidade de vento relativa que conduzem a um número de Reynolds mais próximo do valor de $4,2 \times 10^5$ para o qual a relação C_L/C_D assume valores iguais a 54. Este fato pode ter conduzido, apesar da utilização do estimulador de turbulência em todas as pás para minimizar o efeito do número de Reynolds, que os rotores com maior solidez apresentassem melhor eficiência.

Para o rotor eólico Darrieus foram realizados testes ²⁰ com o mesmo rotor para três valores de Reynolds, obtendo-se varia

ções no valor de C_p de até 30%, demonstrando a influência decisiva deste parâmetro cinemático/dinâmico quando se opera abaixo do valor de Reynolds crítico, para os quais as características de sustentação e arrasto variam bastante.

V.7.3 - Equipamento Experimental

A limitação básica encontrada foi com relação à velocidade máxima do túnel de vento que não permitiu que os rotores eólicos fossem testados acima do valor de Reynolds crítico.

O equipamento de medição operou dentro do esperado sendo no entanto importante a análise do comportamento do sistema de medida de rotação. Para o rotor A.3.25.2031 é observado que a incerteza na determinação da velocidade angular introduz erros da ordem de 7,5% no cálculo de RV e da potência desenvolvida. Fica claro portanto que, para melhorar a precisão dos resultados é necessário um sistema mais preciso, ou realizar a calibração do conversor frequência/voltagem para operar em determinadas faixas de rotação, o que conduzirá a diversas equações de ajuste minimizando as incertezas referentes a cada intervalo de operação. Se por exemplo for ajustado um polinômio para os dados de calibração na faixa de 500 - 1000 Hz a incerteza para a mesma confiabilidade será reduzida em aproximadamente 6 vezes obtendo-se valores finais de precisão bem melhores.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

VI.1 - CONCLUSÃO

A realização deste trabalho teve como meta o desenvolvimento do equipamento experimental e o estudo de uma determinada família de rotores eólicos. Durante todo o trabalho, a preocupação principal foi com respeito à confiabilidade dos resultados levando-se em consideração o equipamento básico disponível. Desse modo, a geração de dados o mais precisos possível e em especial o conhecimento exato das incertezas em cada valor final foram um objetivo constante.

A partir da discussão dos resultados fica claro que, com algumas alterações em relação ao processo de calibração adotado para o medidor de rotação, pode-se melhorar a precisão no resultado final.

Este novo procedimento de calibração não invalida as medições realizadas, alterando-se somente o tratamento dos dados experimentais.

V.2 - SUGESTÕES

Ao término deste trabalho alguns aspectos devem ser ressaltados:

- Características dos perfis aerodinâmicos

A geração de resultados experimentais utilizando-se modelos reduzidos tem como premissa básica o princípio da similaridade geométrica, cinemática e dinâmica. Neste aspecto dois pontos devem ser considerados:

- a) a necessidade do conhecimento do comportamento dos perfis aerodinâmicos a baixos números de Reynolds.
- b) a utilização de um túnel de vento que permite a construção de modelos com maiores dimensões ou com velocidade máxima mais alta.

Fica claro portanto que existe a necessidade do estudo experimental do comportamento dos perfis que serão utilizados nos modelos. Acredito que então, será válida a comparação entre os resultados experimentais com os resultados gerados pelos diversos modelos matemáticos existentes.

- Metodologia de testes experimentais

Ficou claro no decorrer deste trabalho a necessidade de se padronizar um procedimento básico de testes para modelos reduzidos de rotores eólicos em túnel de vento, para que os resultados finais oriundos de diversos Centros de Pesquisa possam ser comparados dentro de um mesmo padrão de referência.

- Equipamento experimental

A aquisição de dados por intermédio do registrador gráfico introduz uma dificuldade principalmente quanto a leitura dos pontos experimentais quando se pretende aumentar a quantidade dos mesmos, a fim de que, com a mesma confiabilidade se obtenham limites de incerteza mais reduzidos. A utilização de um sistema de aquisição de dados através de um micro-computador que em sequência já os irá processando, permite um aprimoramento decisivo na geração dos resultados no que diz respeito principalmente à sua confiabilidade em função da quantidade de pontos levantados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Smulders, P. T. - "Research on Wind Energy at the Eindhoven University of Technology Netherlands", Advanced Wind Energy Systems, Workshop Proceedings, Vol. 1, 1974.
2. Mises, R. V. - "Theory of Flight", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1945.
3. Kaufmann, W. - "Fluid Mechanics", Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., 1973.
4. Fox, R. W. e McDonald, A. T. - "Introdução à Mecânica dos Fluidos", Editora Guanabara Dois, Segunda Edição, 1981.
5. Nogueira, S. L. - "Um Método de Cálculo de Velocidade Induzida em Cataventos com Aplicação a Otimização do Projeto Aerodinâmico", Anais do Congresso Brasileiro de Energia, Vol. B, 1978.
6. Schlichting, H. - "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1955.
7. Abbot, I. H. e Doenhoff, A. E. - "Theory of Wing Sections" , Dover Publications, Inc., New York, 1959.
8. Sedov, L. I. - "Similarity and Dimensional Methods in Mechanics", MIR Publisher, 1982.

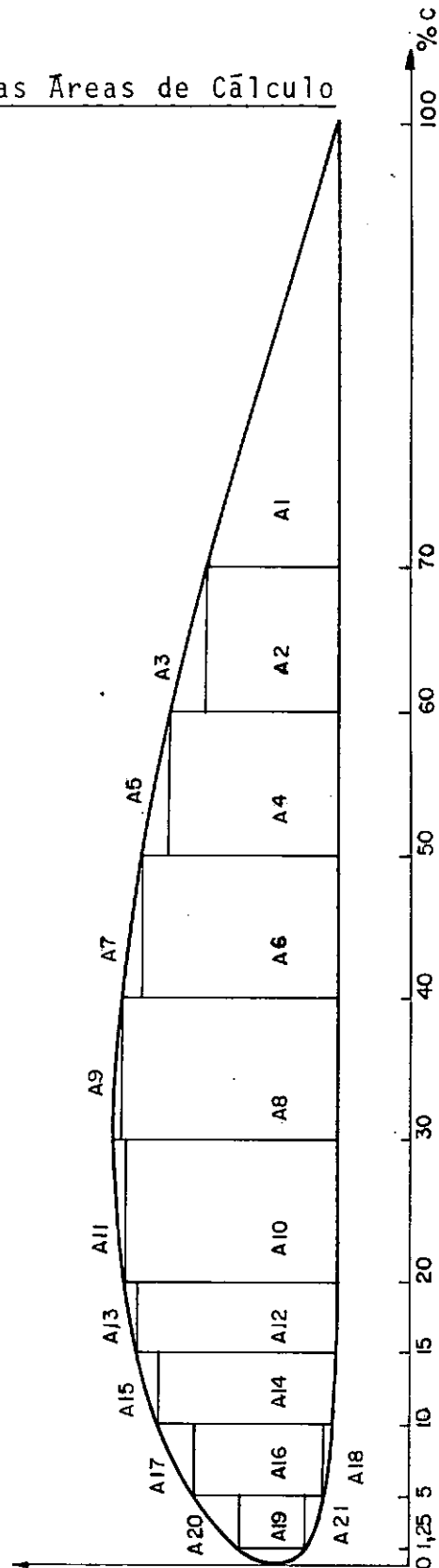
9. Meriam, J. L. - "Statics", John Wiley & Sons., Inc., New York, 1971.
10. Calache, M. D. - "Medida de Velocidade na Câmara de Testes de Túnel de Vento II", Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Aerodinâmica do Programa de Engenharia Mecânica da COPPE/UFRJ, 1982.
11. Goncalves, S. E. - "Transdutor Foto-Elétrico para Deslocamentos", Programa de Engenharia Mecânica - COPPE/UFRJ, Relatório 1/78, 1978.
12. Doebelin, E. O. - "Measurement Systems - Application and Design", McGraw-Hill International Book Co., Third Edition, 1983.
13. Holman, J. P. e Gadjia, W. J. Jr. - "Experimental Methods for Engineers", McGraw-Hill Kogokusha Ltd., Third Edition, 1978.
14. Pope, A. e Harper, J. J. - "Low Speed Wind Tunnel Testing", John Wiley and Sons., Inc., New York, 1966.
15. Mataix, C. - "Mecânica Fluidos y Máquinas Hidráulicas", Harper & Row Publisher, Inc., New York, 1970.
16. Kafuri, S. F. - "Comunicação Particular", junho 1982.

17. Prandtl, L. e Tietjens, O. G. - "Applied Hydro and Aeromechanics", Dover Publications, Inc., New York, 1957.
18. Hunt, V. D. - "Wind Power - A Handbook on Wind Energy Conversion Systems", Van Nostrand Reinhold Company.
19. Banas, J. F. e Sullivam, W. N. - "Engineering of Wind Energy Systems", Sandia Laboratories, SAND74 - 0530, Janeiro 1976.
20. Blackwell, B. F. e Sheldahl, R. E. - "Selected Wind Tunnel Test Results for the Darrieus Wind Turbine", Workshop - VAWRT, pp. II.59 - II.71, Sandia Laboratories, Maio 1976.

APÊNDICE I

CÁLCULO DO RAIO EQUIVALENTE PARA SEÇÃO DO PERFIL GÖ 624

A.I.I - Definição das Áreas de Cálculo



PERFIL GÖ 624

A.I.2 - Tabela com o valor das áreas A_n

A_n	AREA (x $10^{-3} C^2$)
A_1	14,25
A_2	9,50
A_3	1,25
A_4	12,00
A_5	1,025
A_6	14,05
A_7	0,675
A_8	15,40
A_9	0,30
A_{10}	15,30
A_{11}	0,35
A_{12}	7,65
A_{13}	0,2375
A_{14}	6,425
A_{15}	0,375
A_{16}	0,450
A_{17}	0,6125
A_{18}	0,1375
A_{19}	1,8375
A_{20}	0,6094
A_{21}	0,2437
A_{22}	0,2031
Σ	102,8812

C = corda do perfil

A.I.3 - Cálculo do Raio Equivalente em Função da CordaÁrea perfil Gö 624 (A_p)

$$A_p = 102,8812 \times 10^{-3} \times C^2$$

Raio equivalente (r_{eq})

$$r_{eq} = 180,9643 \times 10^{-3} \times C$$

A.I.4 - Cálculo do Raio Equivalente em Função da Solidez, Número de Pás e Diâmetro do Rotor Eólico

$$\sigma = \frac{4.N.C}{\pi.D^2}$$

$$C = \frac{\pi D^2 \sigma}{N}$$

$$r_{eq} = 142,1290 \times \frac{D^2 \times \sigma}{N}$$

APÊNDICE II

CÁLCULO DOS FATORES DE CORREÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO

A.II.1 - Fatores de Bloqueio

Devido a presença das paredes do túnel de vento, ao bloqueio sólido e da esteira, a velocidade do escoamento no rotor eólico será maior do que a velocidade nominal do túnel de vento. O rotor eólico fornecerá deste modo uma potência associada a um valor maior de velocidade do vento o que evidentemente ocasionará erros no cálculo dos coeficientes adimensionais com a velocidade nominal medida. Para tanto se faz necessária a correção através de fatores para tornar os dados o mais próximos da condição do rotor em um escoamento livre.

A.II.2 - Determinação dos Fatores de Bloqueio

Para o caso de rotores eólicos são utilizadas soluções aproximadas para cálculo destes fatores, Pope [14]. A equação para determinação do fator global de correção pode ser escrita:

$$\epsilon_t = \epsilon_{bs} + \epsilon_{be}$$

onde

ϵ_t = bloqueio total

ϵ_{bs} = bloqueio das partes fixas e pás

ϵ_{be} = bloqueio da esteira

Para as parcelas acima podemos dizer que:

$$\epsilon_{bs} = \frac{\text{área frontal das partes fixas e pás}}{4 \times \text{área da seção de testes } (A_T)}$$

$$\epsilon_{be} = \frac{\text{área varrida pelo rotor eólico } (A_V)}{4 \times \text{área da seção de testes } (A_T)}$$

A.II.2.1 - Determinação do ϵ_{be}

$$A_V = \frac{\pi \times 0,45^2}{4} = 0,1590 \text{ m}^2$$

$$A_T = 1,00 \text{ m}^2$$

$$\epsilon_{be} = \frac{0,1590}{4 \times 1}$$

$$\epsilon_{be} = 0,0398$$

A.II.2.2 - Determinação de ϵ_{bs}

A determinação de ϵ_{bs} pode ser dividida em ϵ_{bs} (pás) e ϵ_{bs} (partes fixas).

- Determinação de ε_{bs} (partes fixas)

Torquímetro

$$\phi = 0,088 \text{ m}$$

$$A_1 = \frac{\pi \times 0,088^2}{4}$$

$$A_1 = 0,0061 \text{ m}^2$$

Perfil de sustentação

$$e = 0,025 \text{ m}$$

$$L_{total} = 1,51 \text{ m}$$

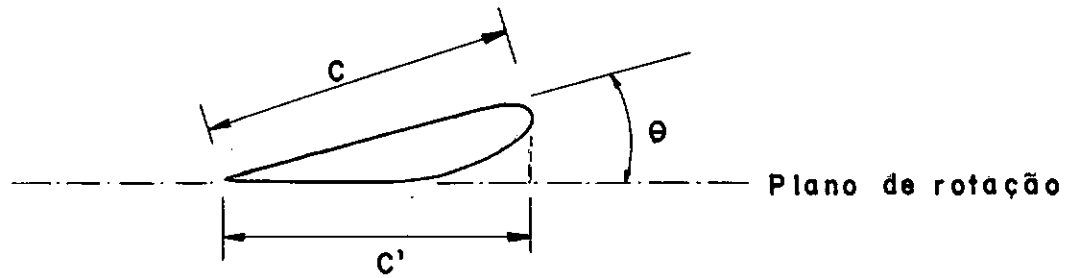
$$A_2 = 0,025 \times 1,51$$

$$A_2 = 0,0378 \text{ m}^2$$

$$\varepsilon_{bs} = \frac{A_1 + A_2}{4 A_T}$$

$$\varepsilon_{bs} \text{ (partes fixas)} = 0,0110$$

- Determinação ϵ_{bs} (pás)



$$C' = C \cdot \cos \theta$$

$$\epsilon_{bs} = \frac{C' \times L \times N}{4 A_T}$$

Na Tabela (A.II.1) estão listados os fatores de bloqueio total para os rotores eólicos em estudo.

NUMERO ROTOR EÓLICO	CORDA DA PA (mm)	ANGULO θ (GRAUS)	ϵ_{bs} (PAS)	ϵ_t ($\epsilon_{bs} + \epsilon_{be}$)
A.3.10.1058	31,0	10	0,0041	0,0549
A.3.15.1058	31,0	15	0,0041	0,0549
A.3.20.1058	31,0	20	0,0040	0,0548
A.3.25.1058	31,0	25	0,0038	0,0546
A.3.30.1058	31,0	30	0,0036	0,0544
A.3.10.1349	39,5	10	0,0053	0,0561
A.3.15.1349	39,5	15	0,0052	0,0560
A.3.20.1349	39,5	20	0,0050	0,0558
A.3.25.1349	39,5	25	0,0049	0,0557
A.3.30.1349	39,5	30	0,0046	0,0554
A.3.10.1639	48,0	10	0,0064	0,0572
A.3.15.1639	48,0	15	0,0063	0,0571
A.3.20.1639	48,0	20	0,0061	0,0569
A.3.25.1639	48,0	25	0,0059	0,0567
A.3.30.1639	48,0	30	0,0056	0,0564
A.3.10.2031	59,5	10	0,0080	0,0588
A.3.15.2031	59,5	15	0,0078	0,0586
A.3.20.2031	59,5	20	0,0076	0,0584
A.3.25.2031	59,5	25	0,0073	0,0581
A.3.30.2031	59,5	30	0,0070	0,0578

TABELA A.II.1 - Fatores de bloqueio

APÊNDICE IIICÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTOA.III.1 - Cálculo da Velocidade do Vento

A velocidade do ar determinada por um tubo de Prandtl e um manômetro de Betz deverá ser corrigida para um valor maior que leve em consideração a redução da área da seção transversal causada pelo bloqueio do rotor eólico. O valor corrigido é dado pela Equação (A.III.1)

$$V = V_M (1 + \epsilon_t) \quad (\text{A.III.1})$$

A velocidade V_M é determinada com a equação (A.III.2) de Bernoulli, Mataix [15]

$$V_M = \sqrt{2g \frac{(\rho' - \rho)}{\rho} \cdot \Delta H} \quad (\text{A.III.2})$$

Levando-se em consideração o fator de correção para determinação da velocidade média na seção, Calache [10], tem-se:

$$V_M = \frac{\sqrt{10^{-3}}}{30} \cdot \sqrt{2g \frac{(\rho' - \rho)}{\rho}} \cdot B \quad (\text{A.III.3})$$

Na Equação (A.III.3) tem-se:

a) Massa específica do fluido manométrico (H_2O)

$$\rho' = \frac{1}{1728} (62,2523 + 0,978476 \times 10^{-2} \times t - 0,145 \times 10^{-3} \times t^2 + 0,217 \times 10^{-6} \times t^3) \times (2,768 \times 10^4) \quad (A.III.4)$$

t = temperatura em graus Fahrenheit

b) Massa específica do ar

$$\rho = \frac{p_{bar} + p_{est}}{R (273 + t)} \quad (A.III.5)$$

$$R = 287,1 \text{ Nm/kg } ^\circ K$$

t = temperatura do escoamento em $^\circ C$

p_{bar} = pressão barométrica em N/m^2

p_{est} = pressão estática do escoamento em N/m^2

O valor da p_{est} do escoamento é muito menor que a p_{bar} de modo que

$$\rho = \frac{p_{bar}}{R(273 + t)} \quad (A.III.6)$$

c) Fator de correção

$$B = 21,0290 + 9,6715 \times \Delta H \quad (A.III.7)$$

ΔH = leitura em mm c.a.

A.III.2 - Determinação da Incerteza no Valor da Velocidade do Vento (V) (Equação A.III.8)

$$V = f(\epsilon_t, \rho, \rho', B)$$

$$\Delta V = \left| \left(\frac{\partial V}{\partial \epsilon_t} \cdot \Delta \epsilon_t \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho} \cdot \Delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \rho'} \cdot \Delta \rho' \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial B} \cdot \Delta B \right)^2 \right|^{1/2}$$

(A.III.8)

a) Determinação da incerteza ρ'

$$\Delta \rho' = \left| \left(\frac{\partial \rho'}{\partial T} \cdot \Delta T \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial T} = (0,157 - 0,005 \times t + 1,043 \times 10^{-5} \times t^2)$$

$$\Delta t = \pm 0,9^{\circ}\text{F} (\pm 0,5^{\circ}\text{C})$$

$$t = 28^{\circ}\text{C} = 80^{\circ}\text{F}$$

A determinação da incerteza no valor de ρ' será para o valor de $T = 28^{\circ}\text{C}$.

$$\Delta \rho' = \pm 0,159 \text{ kg/m}^3$$

b) Determinação da incerteza de ρ

$$\Delta \rho = \left| \left(\frac{\partial \rho}{\partial p_{\text{bar}}} \cdot \Delta p_{\text{bar}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot \Delta t \right)^2 \right|^{1/2}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial p_{\text{bar}}} = \frac{1}{R(273 + t)}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{-p_{\text{bar}}}{R(273 + t)^2}$$

$$\Delta p_{\text{bar}} = \pm 100 \text{ N/m}^2$$

$$\Delta t = \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A determinação da incerteza no valor de ρ será para o valor de $t = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$ e um $p_{\text{bar}} = 101200 \text{ N/m}^2$

$$\Delta \rho = \pm 5,123 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$$

c) Determinação na incerteza de B

$$\Delta B = \left| \left[\left(\frac{\partial B}{\partial (\Delta H)} \cdot \Delta(\Delta H) \right)^2 \right]^{1/2} \right|$$

$$\frac{\partial B}{\partial (\Delta H)} = 9,6712$$

$$\Delta(\Delta H) = 0,05 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$\Delta B = \pm 0,484$$

d) Determinação na incerteza de ϵ_t

A determinação da incerteza no valor de ϵ_t não é possível em virtude do mesmo já ser um valor aproximado. Portanto, se rá admitido para ϵ_t uma incerteza de 25% ou seja:

$$\Delta\epsilon_t = \pm 0,25 (\epsilon_t)$$

$$\epsilon_t = 0,0588 \text{ (máximo)}$$

$$\Delta\epsilon_t = \pm 0,015$$

Com as incertezas anteriores será calculado um valor de ΔV aproximado para o qual tem-se

$$\rho = 1,1497 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho' = 994,667 \text{ kg/m}^3$$

$$\epsilon_t = 0,0588 \text{ (máximo)}$$

$$\Delta H = 5,4 \text{ mm c.a.}$$

$V_M = 9,5 \text{ m/s}$ que são valores médios registrados durante os testes.

$$\frac{\partial V}{\partial \epsilon_t} = 10,043$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho'} = 0,005$$

$$\frac{\partial V}{\partial \rho} = 4,630$$

$$\frac{\partial V}{\partial B} = 0,145$$

$$\Delta V = |(10,043 \times 0,015)^2 + (0,005 \times 0,159)^2 +$$

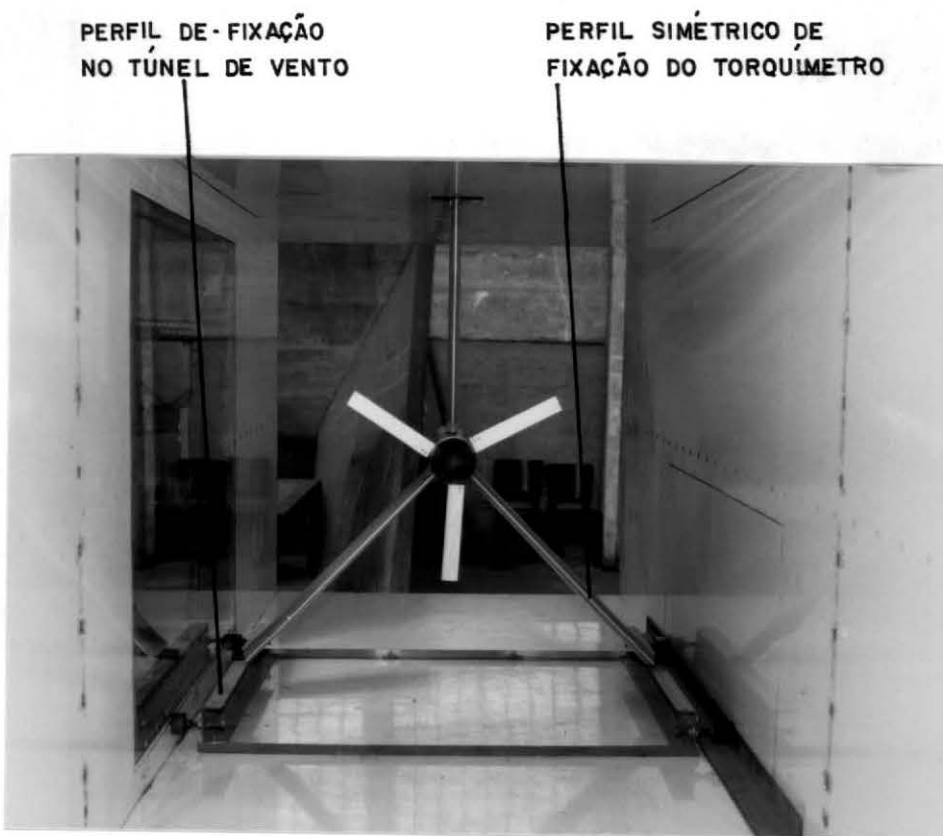
$$+ (4,630 \times 5,123 \times 10^{-6})^2 + (0,145 \times 0,484)^2|^{1/2}$$

$$V = |0,02 + 6,32 \times 10^{-7} + 5,63 \times 10^{-10} + 4,94 \times 10^{-3}|^{1/2}$$

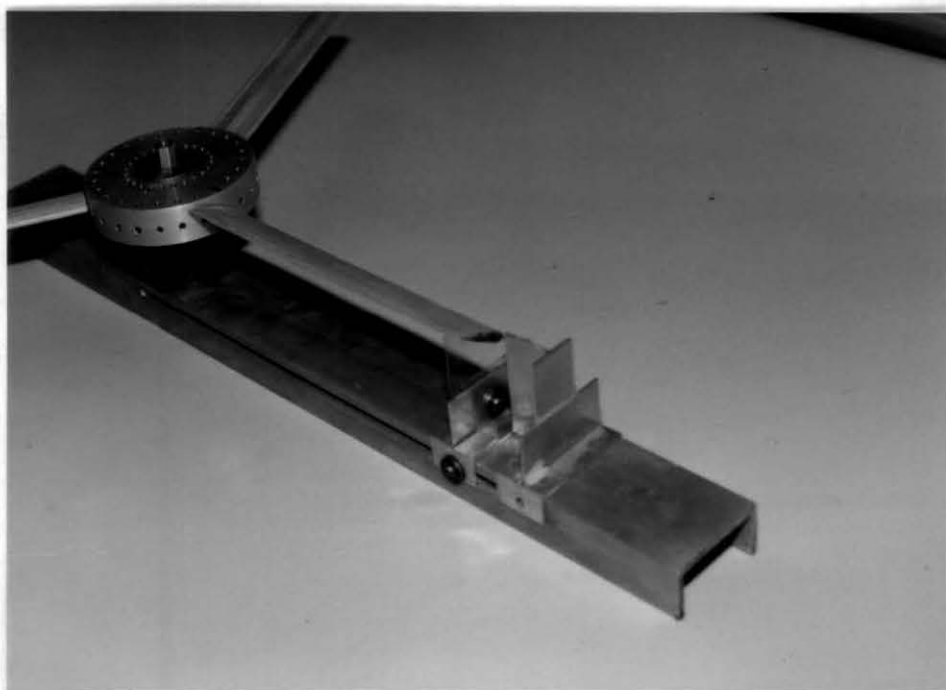
(A.III.9)

$$\Delta V = \pm 0,167 \text{ m/s}$$

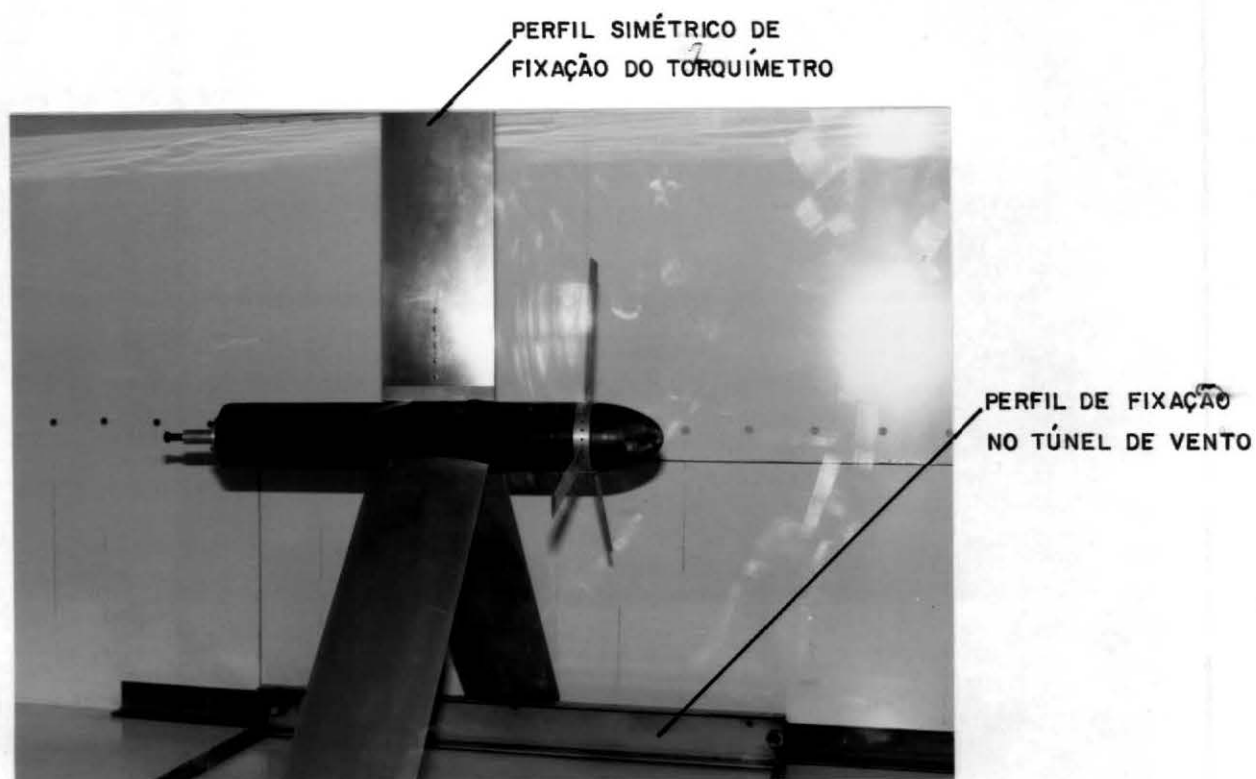
Para a velocidade considerada a incerteza representa
 $\pm 1,8\%$.

APÊNDICE IVFOTOGRAFIAS E DESENHOSA.VI.1 - FOTOGRAFIAS

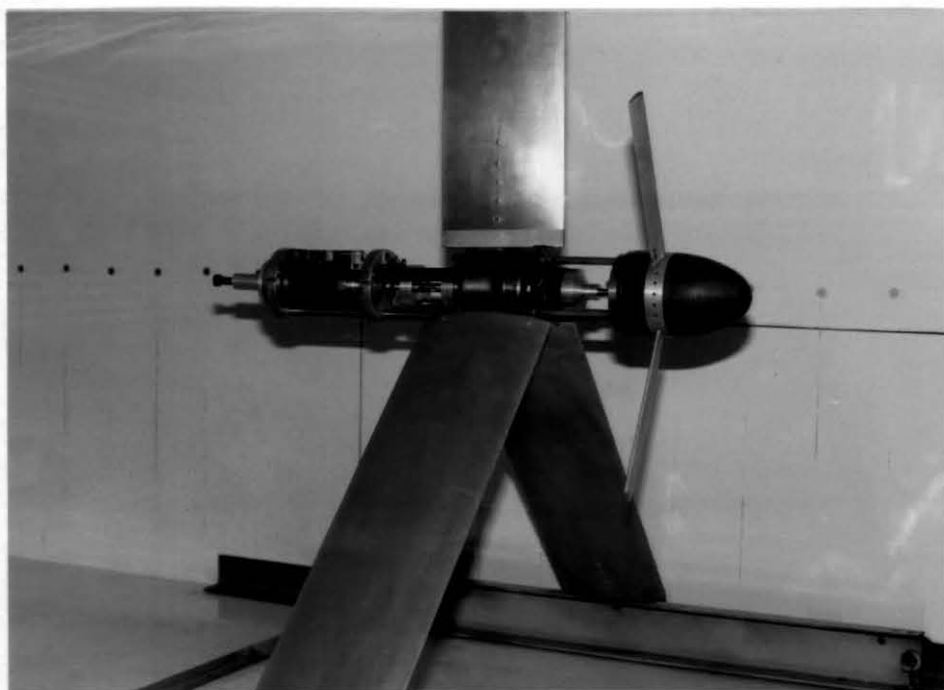
Fotografia 1 - Fixação do torquímetro ao Túnel de Vento



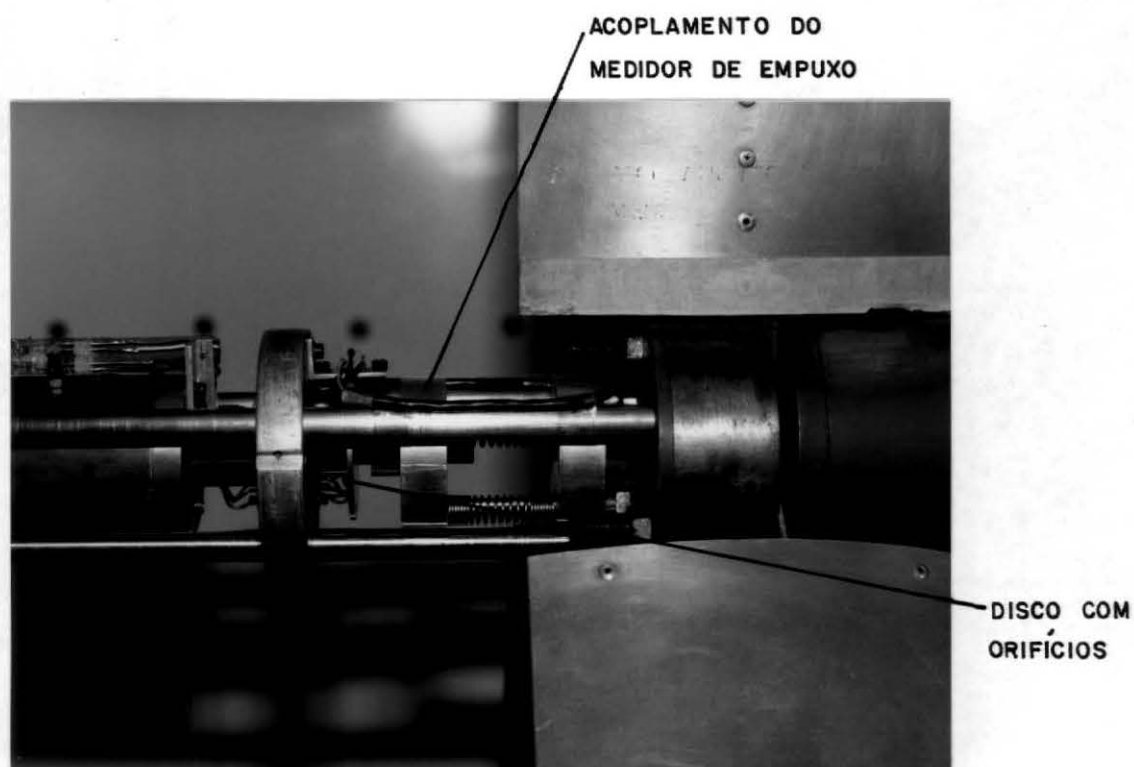
Fotografia 2 - Gabarito de montagem das pás



Fotografia 3 - Torquímetro LMF-A2



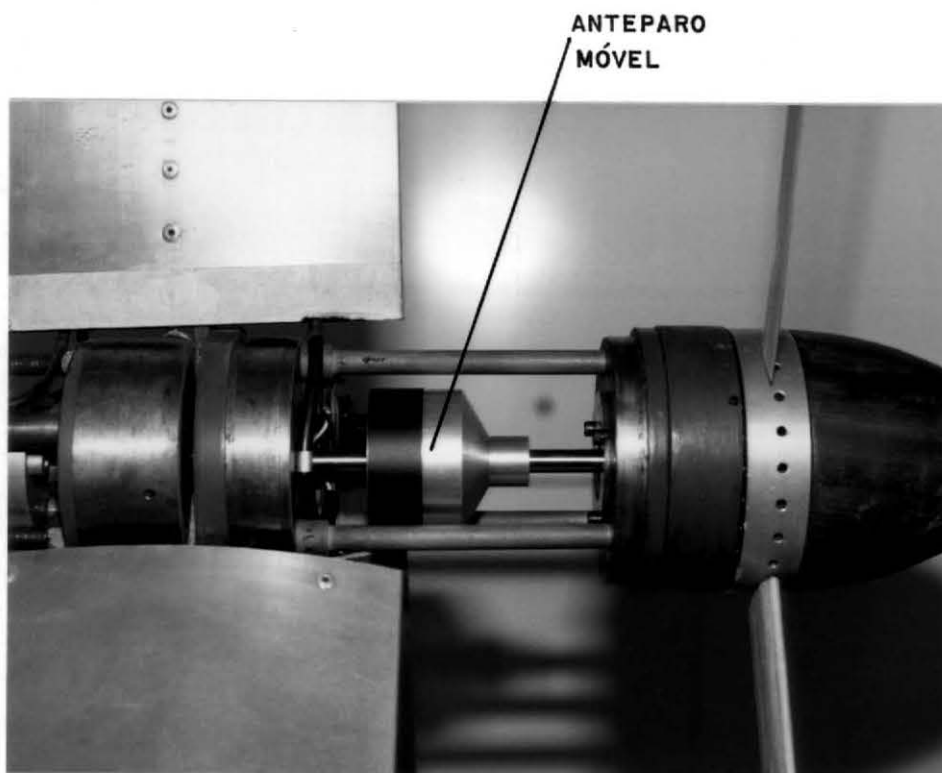
Fotografia 4 - Vista interna do torquímetro LMF-A2



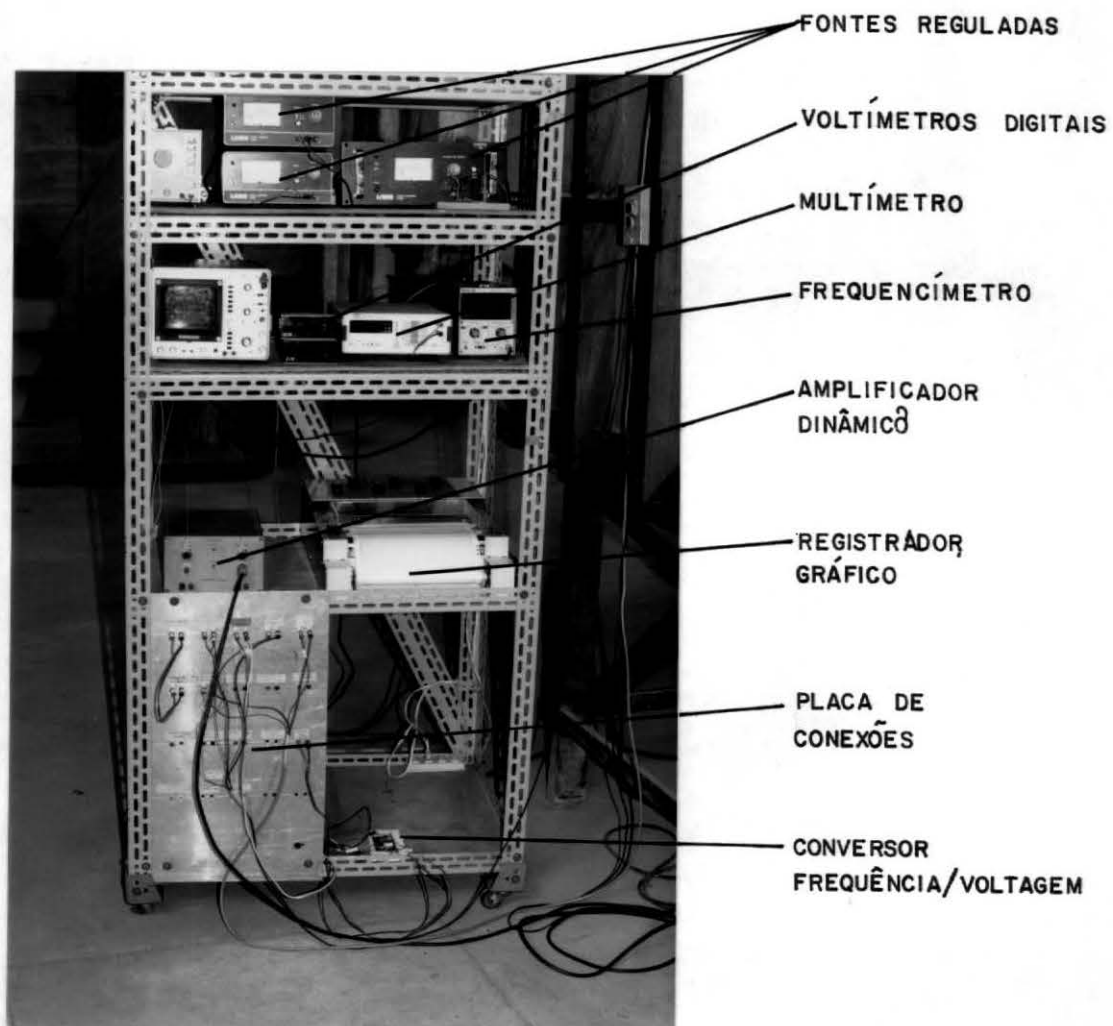
Fotografia 5 - Medidor de rotação e acoplamento do medidor de empuxo



Fotografia 6 - Extensômetros elétricos e parafuso de acionamento do freio mecânico

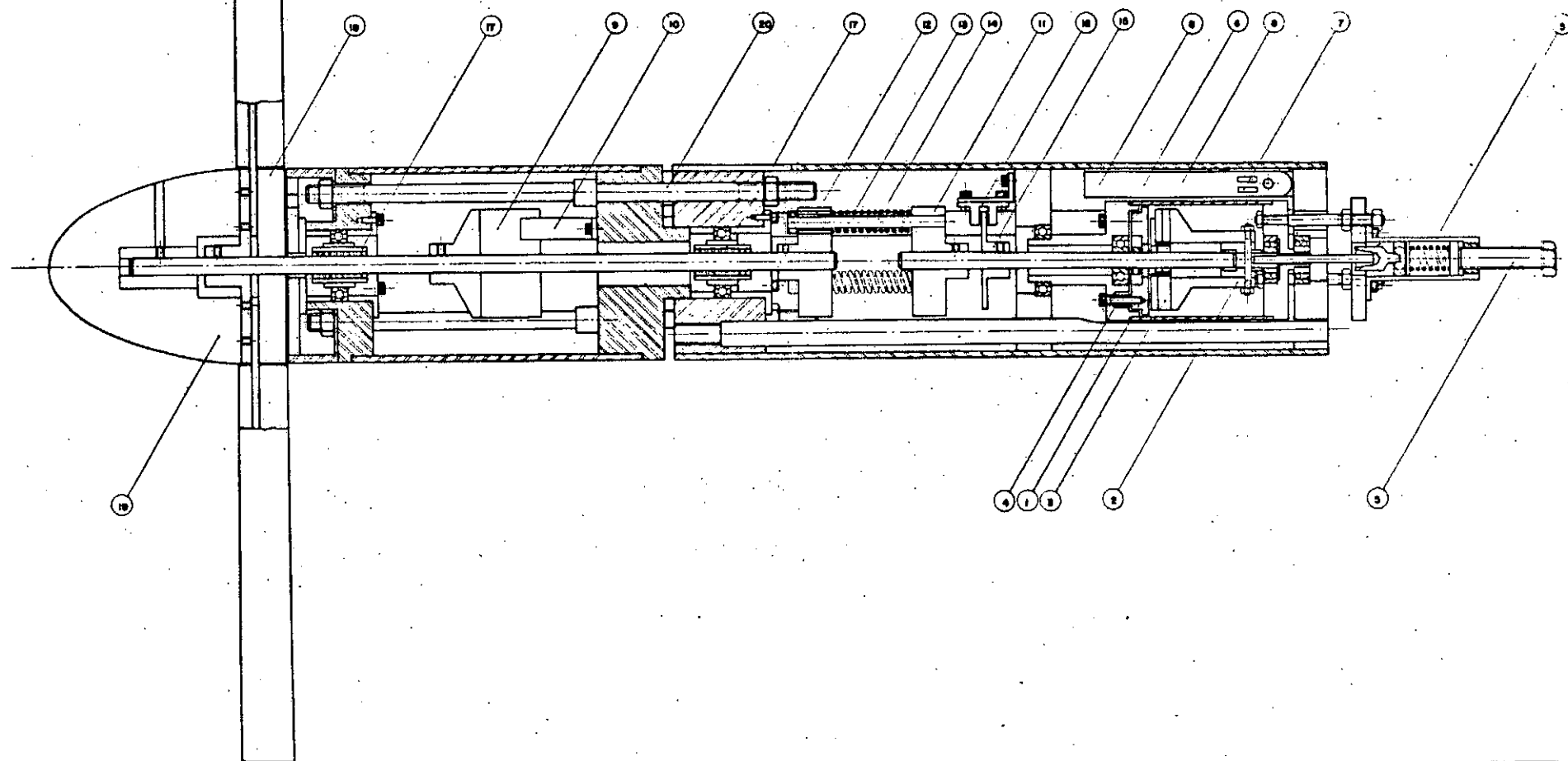


Fotografia 7 - Anteparo móvel do medidor de empuxo



Fotografia 8 - Bancada de instrumentos

A.IV.2 - Desenho de conjunto do torquímetro LMF-A2



SISTEMA	NÚMERO	DESCRIÇÃO	NÚMERO	DESCRIÇÃO	NÚMERO	DESCRIÇÃO	NÚMERO	DESCRIÇÃO
TORQUE	1	SAPATA FIXA	3	PASTILHA PREENCHEM BORRACHA HERMÉTICA	5	PARAFUSO ALCANTARAL DO FREIO	7	EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS
	2	CONJUNTO SAPATA MOVEL	4	ROLAS DA SAPATA FIXA	6	BARRA FLEXÍVEL	8	PONTOS DE APLICAÇÃO DA FORÇA REATIVA
EMPUXO	9	ANTEPARMO MOVEL	11	ACOPLAMENTO DO REDUTOR DE VELOCIDADE	13	ROLAS DO REDUTOR DE VELOCIDADE		
	10	CONJUNTO CILINDRO RECEPTOR	12	PERNA DE TENSOR	14	PERNA GUIA		
ROTAÇÃO	15	ELISÓPIO SEM BRILHO	16	CONJUNTO EMBRASA RECEPTOR	18	BRANCA DE FIXAÇÃO DAS PIS	20	PILO DE FIXAÇÃO DO TUBO DE SUSTENTAÇÃO
GERAL	17	MASCAL COM DOIS GRÁFOS DE LIBERDADE						

LABORATÓRIO MECÂNICA DOS FLUIDOS E AERODINÂMICA

TORQUIMETRO LMF - A2

DESENHO DE CONJUNTO

DESENHO

01

ESCALA

1:2

DESENHO

CARLOS RICHTELIN

DATA

JANEIRO 1963

APÊNDICE V

DADOS DE CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIDAS

A.V.1 - Sistema de Medição de Empuxo

DADOS DE CALIBRACAO DO MEDIDOR DE EMPUXO
 TORQUE TRANSMITIDO NO ACOPLAMENTO 0.00 N.M
 COORDENADA X= MASSA EM GRAMAS
 COORDENADA Y= TENSÃO MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=1.038
X(2)=40	Y(2)=1.087
X(3)=90	Y(3)=1.153
X(4)=140	Y(4)=1.213
X(5)=190	Y(5)=1.282
X(6)=240	Y(6)=1.352
X(7)=290	Y(7)=1.426
X(8)=340	Y(8)=1.514
X(9)=390	Y(9)=1.611
X(10)=440	Y(10)=1.701
X(11)=490	Y(11)=1.835
X(12)=540	Y(12)=1.966
X(13)=590	Y(13)=2.098
X(14)=640	Y(14)=2.279
X(15)=690	Y(15)=2.462
X(16)=740	Y(16)=2.677
X(17)=790	Y(17)=2.831
X(18)=840	Y(18)=2.977

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 2 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2$$

onde: $C_0 = 1.06982343$

C_1

$C_1 = 6.02156449E-04$

C_2

$C_2 = 2.02752087E-06$

C_2

COEF. DE CORRELACAO = .998580214

DADOS DE CALIBRACAO DO MEDIDOR DE EMPUXO
 TORQUE TRANSMITIDO NO ACOPLAMENTO 0.05 N.M
 COORDENADA X= MASSA EM GRAMAS
 COORDENADA Y= TENSAO MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=1.038
X(2)=40	Y(2)=1.064
X(3)=90	Y(3)=1.105
X(4)=140	Y(4)=1.169
X(5)=190	Y(5)=1.231
X(6)=240	Y(6)=1.297
X(7)=290	Y(7)=1.37
X(8)=340	Y(8)=1.451
X(9)=390	Y(9)=1.523
X(10)=440	Y(10)=1.641
X(11)=490	Y(11)=1.75
X(12)=540	Y(12)=1.872
X(13)=590	Y(13)=2.005
X(14)=640	Y(14)=2.165
X(15)=690	Y(15)=2.35
X(16)=740	Y(16)=2.563
X(17)=790	Y(17)=2.738
X(18)=840	Y(18)=2.88

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 2 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2$$

onde: C = 1.05759187

0

C = 3.8728887E-04

1

C = 2.15216775E-06

2

COEF. DE CORRELACAO = .998728835

DADOS DE CALIBRACAO DO MEDIDOR DE EMPUXO
 TORQUE TRANSMITIDO NO ACOPLAMENTO 0.10 N.M
 COORDENADA X= MASSA EM GRAMAS
 COORDENADA Y= TENSÃO MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=1.038
X(2)=40	Y(2)=1.053
X(3)=90	Y(3)=1.083
X(4)=140	Y(4)=1.13
X(5)=190	Y(5)=1.185
X(6)=240	Y(6)=1.272
X(7)=290	Y(7)=1.326
X(8)=340	Y(8)=1.405
X(9)=390	Y(9)=1.49
X(10)=440	Y(10)=1.57
X(11)=490	Y(11)=1.691
X(12)=540	Y(12)=1.805
X(13)=590	Y(13)=1.92
X(14)=640	Y(14)=2.06
X(15)=690	Y(15)=2.22
X(16)=740	Y(16)=2.421
X(17)=790	Y(17)=2.598
X(18)=840	Y(18)=2.765

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 2 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2$$

onde: $C_0 = 1.04728351$

C_1

$C_1 = 3.08828688E-04$

C_2

$C_2 = 2.05763089E-06$

C_2

COEF. DE CORRELACAO = .999072898

DADOS DE CALIBRACAO DO MEDIDOR DE EMPUXO
 TORQUE TRANSMITIDO NO ACOPLAMENTO 0.15 N.M
 COORDENADA X= MASSA EM GRAMAS
 COORDENADA Y= TENSAD MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=1.038
X(2)=40	Y(2)=1.049
X(3)=90	Y(3)=1.064
X(4)=140	Y(4)=1.089
X(5)=190	Y(5)=1.138
X(6)=240	Y(6)=1.186
X(7)=290	Y(7)=1.248
X(8)=340	Y(8)=1.322
X(9)=390	Y(9)=1.4
X(10)=440	Y(10)=1.495
X(11)=490	Y(11)=1.597
X(12)=540	Y(12)=1.69
X(13)=590	Y(13)=1.809
X(14)=640	Y(14)=1.935
X(15)=690	Y(15)=2.083
X(16)=740	Y(16)=2.253
X(17)=790	Y(17)=2.419
X(18)=840	Y(18)=2.6

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 2 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2$$

onde: $C_0 = 1.04153619$

C_1

$C_1 = 9.3987738E-05$

C_2

$C_2 = 2.07930975E-06$

C_2

COEF. DE CORRELACAO = .999694055

DADOS DE CALIBRACAO DO MEDIDOR DE EMPUXO
 TORQUE TRANSMITIDO NO ACOPLAMENTO 0.20 N.M
 COORDENADA X= MASSA EM GRAMAS
 COORDENADA Y= TENSÃO MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=1.038
X(2)=40	Y(2)=1.04
X(3)=90	Y(3)=1.044
X(4)=140	Y(4)=1.068
X(5)=190	Y(5)=1.09
X(6)=240	Y(6)=1.12
X(7)=290	Y(7)=1.181
X(8)=340	Y(8)=1.245
X(9)=390	Y(9)=1.313
X(10)=440	Y(10)=1.405
X(11)=490	Y(11)=1.498
X(12)=540	Y(12)=1.592
X(13)=590	Y(13)=1.693
X(14)=640	Y(14)=1.81
X(15)=690	Y(15)=1.94
X(16)=740	Y(16)=2.091
X(17)=790	Y(17)=2.258
X(18)=840	Y(18)=2.432

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 2 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2$$

onde: $C_0 = 1.03941049$

C_1

$C_1 = -1.18943539E-04$

C_2

$C_2 = 2.09647173E-06$

C_2

COEF. DE CORRELACAO = .999647644

A.V.2 - Sistema de Medição de Torque

DADOS DE CALIBRACAO DO MEDIDOR DE TORQUE
 VALOR DE TORQUE MAXIMO= 0.25 N.M
 COORDENADA X= MASSA EM GRAMAS
 COORDENADA Y= TENSÃO MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=0
X(2)=50	Y(2)=.116
X(3)=100	Y(3)=.235
X(4)=150	Y(4)=.351
X(5)=200	Y(5)=.471
X(6)=250	Y(6)=.581
X(7)=300	Y(7)=.696
X(8)=350	Y(8)=.809
X(9)=400	Y(9)=.914
X(10)=450	Y(10)=1.037
X(11)=500	Y(11)=1.148
X(12)=550	Y(12)=1.265
X(13)=600	Y(13)=1.398
X(14)=650	Y(14)=1.509
X(15)=700	Y(15)=1.626
X(16)=750	Y(16)=1.74

AJUSTE LINEAR

$$Y = A + B * X$$

onde : $A=6.17649679E-04$

$B=2.31435294E-03$

Coef. de correlacao = .999875944

DADOS DE CALIBRACAO DO MEDIDOR DE TORQUE
 VALOR DE TORQUE MAXIMO= 0.50 N.M
 COORDENADA X= MASSA EM GRAMAS
 COORDENADA Y= TENSÃO MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=0
X(2)=100	Y(2)=.077
X(3)=200	Y(3)=.151
X(4)=300	Y(4)=.227
X(5)=400	Y(5)=.303
X(6)=500	Y(6)=.378
X(7)=600	Y(7)=.45
X(8)=700	Y(8)=.525
X(9)=800	Y(9)=.604
X(10)=900	Y(10)=.676
X(11)=1000	Y(11)=.751
X(12)=1100	Y(12)=.828
X(13)=1200	Y(13)=.912
X(14)=1300	Y(14)=.956
X(15)=1400	Y(15)=1.029
X(16)=1500	Y(16)=1.1

AJUSTE LINEAR

$$Y = A + B * X$$

onde : $A=6.83823654E-03$

$B=7.38132352E-04$

Coef. de correlacao = .99941837

A.V.3 - Sistema de Medição da Rotação

DADOS DE CALIBRACAO DO CONVERSOR FREQUENCIA/VOLTAGEM
 COORDENADA X= FREQUENCIA EM HERTZ
 COORDENADA Y= TENSÃO MEDIA DE LEITURA EM VOLTS

X(1)=0	Y(1)=0
X(2)=100	Y(2)=.134
X(3)=200	Y(3)=.235
X(4)=300	Y(4)=.336
X(5)=400	Y(5)=.437
X(6)=500	Y(6)=.537
X(7)=600	Y(7)=.625
X(8)=700	Y(8)=.721
X(9)=800	Y(9)=.819
X(10)=900	Y(10)=.911
X(11)=1000	Y(11)=1.006
X(12)=1100	Y(12)=1.1
X(13)=1200	Y(13)=1.196
X(14)=1300	Y(14)=1.292
X(15)=1400	Y(15)=1.386
X(16)=1500	Y(16)=1.482

AJUSTE LINEAR

$$Y = A + B * X$$

onde : $A = .0376617671$

$B = 9.67867645E-04$

Coef. de correlacao = .999326844

A.V.4 - Levantamento de Perdas Mecânicas

DADOS DE LEVANTAMENTO DAS PERDAS MECANICAS
 COORDENADA X= TEMPO EM SEGUNDOS
 COORDENADA Y= VELOCIDADE ANGULAR MEDIA EM RAD/SEG

X(1)=0	Y(1)=314.159
X(2)=2	Y(2)=305.782
X(3)=4	Y(3)=299.498
X(4)=6	Y(4)=291.121
X(5)=8	Y(5)=282.743
X(6)=10	Y(6)=272.271
X(7)=12	Y(7)=261.799
X(8)=14	Y(8)=253.422
X(9)=16	Y(9)=247.139
X(10)=18	Y(10)=238.761
X(11)=20	Y(11)=232.478
X(12)=22	Y(12)=224.1
X(13)=24	Y(13)=217.817
X(14)=26	Y(14)=211.534
X(15)=28	Y(15)=205.251
X(16)=30	Y(16)=198.968
X(17)=32	Y(17)=192.684
X(18)=34	Y(18)=186.401
X(19)=36	Y(19)=182.212
X(20)=38	Y(20)=175.929
X(21)=40	Y(21)=171.74
X(22)=42	Y(22)=165.457
X(23)=44	Y(23)=161.268
X(24)=46	Y(24)=157.08
X(25)=48	Y(25)=152.891
X(26)=50	Y(26)=148.702
X(27)=52	Y(27)=144.513
X(28)=54	Y(28)=140.324
X(29)=56	Y(29)=136.136
X(30)=58	Y(30)=131.947
X(31)=60	Y(31)=127.758
X(32)=62	Y(32)=123.569
X(33)=64	Y(33)=121.475

DADOS DE LEVANTAMENTO DAS PERDAS MECANICAS
COORDENADA X= TEMPO EM SEGUNDOS
COORDENADA Y= VELOCIDADE ANGULAR MEDIA EM RAD/SEG

X(1)=66	Y(1)=117.286
X(2)=68	Y(2)=115.192
X(3)=70	Y(3)=108.909
X(4)=72	Y(4)=104.72
X(5)=74	Y(5)=100.531
X(6)=76	Y(6)=96.342
X(7)=78	Y(7)=94.248
X(8)=80	Y(8)=92.153
X(9)=82	Y(9)=85.87
X(10)=84	Y(10)=83.776
X(11)=86	Y(11)=77.493
X(12)=88	Y(12)=75.398
X(13)=90	Y(13)=71.209
X(14)=92	Y(14)=67.021
X(15)=94	Y(15)=64.926
X(16)=96	Y(16)=60.737
X(17)=98	Y(17)=56.549
X(18)=100	Y(18)=52.36
X(19)=102	Y(19)=48.171
X(20)=104	Y(20)=46.077
X(21)=106	Y(21)=41.888
X(22)=108	Y(22)=37.699
X(23)=110	Y(23)=35.605
X(24)=112	Y(24)=31.416
X(25)=114	Y(25)=27.227
X(26)=116	Y(26)=20.944
X(27)=118	Y(27)=16.755
X(28)=120	Y(28)=14.661
X(29)=122	Y(29)=12.566
X(30)=124	Y(30)=6.283
X(31)=126	Y(31)=2.094
X(32)=127	Y(32)=0

POLINOMIO AJUSTADO
 VARIABEL X= TEMPO EM SEGUNDOS
 VARIABEL Y= VELOCIDADE ANGULAR EM RAD/SEG
 $0 \leq X \leq 64$ SEG

AJUSTE EXPONENCIAL

$$Y = A * \text{EXP} (B * X)$$

onde : $A = 314.429663$

$$B = -.0150571706$$

Coef. de correlacao = .999449019

POLINOMIO AJUSTADO
 VARIABEL X= TEMPO EM SEGUNDOS
 VARIABEL Y= VELOCIDADE ANGULAR EM RAD/SEG
 $66 \leq X \leq 127$ SEG

AJUSTE LINEAR

$$Y = A + B * X$$

onde : $A=242.132633$

$$B=-1.89562948$$

Coef. de correlacao = .998972784

APÊNDICE VIPOLINÔMIOS DE AJUSTE E CURVAS DA FAMÍLIA AA.VI.1 - Dados e Coeficientes dos Polinômios de Ajuste da CurvaC_p x RV

ROTOR A.3.10.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=8.4527	Y(1)=3.32
X(2)=8.1268	Y(2)=5.89
X(3)=7.8105	Y(3)=8.03
X(4)=7.3571	Y(4)=10.83
X(5)=6.7432	Y(5)=13.8
X(6)=6.0349	Y(6)=15.89
X(7)=8.2827	Y(7)=3.95
X(8)=7.9238	Y(8)=6.94
X(9)=7.598	Y(9)=9.33
X(10)=7.1163	Y(10)=11.95
X(11)=6.3324	Y(11)=14.37
X(12)=5.4824	Y(12)=15.66

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -63.6619309$

$C_1 = 31.3995257$

$C_2 = -3.65080876$

$C_3 = .102928676$

COEF. DE CORRELACAO = .995774379

ROTOR A.3.15.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=7.4575	Y(1)=3.54
X(2)=7.1851	Y(2)=5.84
X(3)=6.9503	Y(3)=7.54
X(4)=6.6967	Y(4)=8.86
X(5)=6.3116	Y(5)=11.86
X(6)=5.997	Y(6)=12.41
X(7)=4.3345	Y(7)=13.55
X(8)=7.3354	Y(8)=4.61
X(9)=7.0066	Y(9)=6.72
X(10)=6.6967	Y(10)=8.55
X(11)=6.4196	Y(11)=10.67
X(12)=6.0111	Y(12)=12.57
X(13)=4.621	Y(13)=13.68

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -50.0517251$

C_1

$C_2 = 27.951858$

C_3

$C_4 = -3.47841764$

C_5

$C_6 = .0929670613$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .992436329

ROTOR A.3.20.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=5.4966	Y(1)=2.1
X(2)=5.2859	Y(2)=3.75
X(3)=5.1127	Y(3)=4.6
X(4)=4.9535	Y(4)=5.71
X(5)=4.5415	Y(5)=7.29
X(6)=4.0405	Y(6)=8.2
X(7)=3.5021	Y(7)=8.54
X(8)=5.4451	Y(8)=2.36
X(9)=5.2251	Y(9)=4.1
X(10)=4.9816	Y(10)=5.75
X(11)=4.799	Y(11)=6.96
X(12)=3.9235	Y(12)=8.56

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 28.61392$

$C_1 = -19.0873108$

$C_2 = 5.95945456$

$C_3 = -.612877966$

COEF. DE CORRELACAO = .993499933

ROTOR A.3.25.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=4.2699	Y(1)=2.08
X(2)=4.1318	Y(2)=4.12
X(3)=4.0241	Y(3)=5.46
X(4)=3.879	Y(4)=7.12
X(5)=3.6496	Y(5)=8.52
X(6)=3.3991	Y(6)=9.94
X(7)=3.0807	Y(7)=10.93
X(8)=2.76	Y(8)=11.53
X(9)=4.2699	Y(9)=1.79
X(10)=4.2161	Y(10)=3.4
X(11)=4.0756	Y(11)=4.76
X(12)=3.9071	Y(12)=6.57
X(13)=3.7151	Y(13)=8.3
X(14)=3.3476	Y(14)=10.25

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 73.3767893$

$C_1 = -60.9725922$

$C_2 = 20.5633569$

$C_3 = -2.38708712$

COEF. DE CORRELACAO = .997028372

ROTOR A.3.30.1058
 EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2
 COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE
 COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=3.0199	Y(1)=1.76
X(2)=2.9894	Y(2)=2.89
X(3)=2.4955	Y(3)=6.62
X(4)=2.3293	Y(4)=7.64
X(5)=3.0643	Y(5)=1.68
X(6)=2.5681	Y(6)=6.7
X(7)=2.3784	Y(7)=7.43

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 146.330275$
 $C_1 = -165.368295$
 $C_2 = 67.2608433$
 $C_3 = -9.37277775$

COEF. DE CORRELACAO = .991171876

ROTOR A.3.10.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=8.3526	Y(1)=2.6
X(2)=7.9598	Y(2)=5.86
X(3)=7.6191	Y(3)=8.58
X(4)=7.4109	Y(4)=10
X(5)=7.05120001	Y(5)=11.99
X(6)=6.8288	Y(6)=13.74
X(7)=6.4123	Y(7)=16.11
X(8)=5.906	Y(8)=19.31
X(9)=5.4469	Y(9)=20.53
X(10)=5.1583	Y(10)=21.42
X(11)=4.5809	Y(11)=21.57
X(12)=8.2769	Y(12)=2.66
X(13)=7.9125	Y(13)=5.57
X(14)=7.6806	Y(14)=8.33
X(15)=7.302	Y(15)=10.53
X(16)=6.9471	Y(16)=12.8
X(17)=6.5922	Y(17)=15.26
X(18)=5.5321	Y(18)=20.3
X(19)=4.9453	Y(19)=21.66

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -43.3764292$

C_1

$C_2 = 31.8860778$

C_3

$C_4 = -4.70698888$

C_5

$C_6 = .185184517$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .998153154

ROTOR A.3.15.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=7.0651	Y(1)=6.3
X(2)=6.9229	Y(2)=7.7
X(3)=6.5767	Y(3)=11.15
X(4)=6.2401	Y(4)=12.97
X(5)=6.1215	Y(5)=16.15
X(6)=4.6563	Y(6)=19.14
X(7)=4.2343	Y(7)=19.97
X(8)=7.2074	Y(8)=3.9
X(9)=7.0556	Y(9)=6.01
X(10)=6.4914	Y(10)=10.37
X(11)=5.9176	Y(11)=14.41
X(12)=4.7512	Y(12)=19.57

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 42.4797138$

$C_1 = -15.6638565$

$C_2 = 3.87706255$

$C_3 = -.338637722$

COEF. DE CORRELACAO = .980351965

ROTOR A.3.20.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=5.4568	Y(1)=2.32
X(2)=5.22570001	Y(2)=4.61
X(3)=5.0889	Y(3)=6.11
X(4)=4.9238	Y(4)=7.28
X(5)=4.7776	Y(5)=8.96
X(6)=4.589	Y(6)=10.41
X(7)=4.4333	Y(7)=11.89
X(8)=4.1645	Y(8)=12.98
X(9)=3.8532	Y(9)=14.24
X(10)=5.5228	Y(10)=1.84
X(11)=5.2775	Y(11)=4.24
X(12)=5.1927	Y(12)=5.17
X(13)=5.0747	Y(13)=6.66
X(14)=4.71160001	Y(14)=9.17
X(15)=4.3343	Y(15)=11.63
X(16)=3.8579	Y(16)=13.72
X(17)=3.3722	Y(17)=14.06

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -78.6018661$

$C_1 = 60.5235749$

$C_2 = -12.1136046$

$C_3 = .686046937$

CDEF. DE CORRELACAO = .99660119

ROTOR A.3.25.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=4.1754	Y(1)=1.67
X(2)=4.0152	Y(2)=2.94
X(3)=3.9398	Y(3)=4.62
X(4)=3.8267	Y(4)=5.65
X(5)=3.6759	Y(5)=6.5
X(6)=3.5581	Y(6)=7.35
X(7)=3.3931	Y(7)=7.99
X(8)=3.1198	Y(8)=8.7
X(9)=3.0444	Y(9)=9.88
X(10)=4.1377	Y(10)=1.86
X(11)=4.034	Y(11)=3.17
X(12)=3.9445	Y(12)=4.39
X(13)=3.822	Y(13)=5.34
X(14)=3.7654	Y(14)=6.34
X(15)=3.6052	Y(15)=7.24
X(16)=3.3931	Y(16)=8.27
X(17)=3.1198	Y(17)=9.14
X(18)=2.5354	Y(18)=8.22

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -29.2164639$

$C_1 = 23.7050083$

$C_2 = -2.89907134$

$C_3 = -.243369806$

COEF. DE CORRELACAO = .986239251

ROTOR A.3.30.1349

EQUIFAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=3.0088	Y(1)=2.29
X(2)=2.978	Y(2)=5.54
X(3)=2.8101	Y(3)=7.7
X(4)=2.415	Y(4)=9.23
X(5)=2.1478	Y(5)=9.35
X(6)=3.0253	Y(6)=1.56
X(7)=2.2873	Y(7)=9.24
X(8)=2.1525	Y(8)=9.48
X(9)=2.0342	Y(9)=9.64
X(10)=1.9538	Y(10)=9.71

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 364.768656$

$C_1 = -460.971431$

$C_2 = 198.155006$

$C_3 = -28.2242812$

COEF. DE CORRELACAO = .954338594

ROTOR A.3.10.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=7.7113	Y(1)=6.71
X(2)=7.1663	Y(2)=15
X(3)=6.7871	Y(3)=21.12
X(4)=6.2563	Y(4)=25.89
X(5)=5.4648	Y(5)=33.86
X(6)=4.1993	Y(6)=38.47
X(7)=6.8013	Y(7)=19.91
X(8)=5.8913	Y(8)=29.42
X(9)=5.0477	Y(9)=35.92

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -3.06860397$

C_1

$C_2 = 21.7665864$

C_3

$C_4 = -3.02429924$

C_5

$C_6 = .0476331185$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .998143279

ROTOR A.3.15.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=7.0228	Y(1)=6.65
X(2)=6.7032	Y(2)=11.63
X(3)=6.3929	Y(3)=17.49
X(4)=5.904	Y(4)=23.07
X(5)=5.3682	Y(5)=28.81
X(6)=4.6866	Y(6)=32.64
X(7)=7.1027	Y(7)=4.68
X(8)=6.7925	Y(8)=9.32
X(9)=6.45400001	Y(9)=15.32
X(10)=6.078	Y(10)=19.99
X(11)=5.7489	Y(11)=23.62
X(12)=5.2883	Y(12)=28.66
X(13)=4.884	Y(13)=31.41
X(14)=4.3575	Y(14)=33.59

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -29.2122568$

$C_1 = 33.0656772$

$C_2 = -4.75221668$

$C_3 = .108544193$

COEF. DE CORRELACAO = .99689798

ROTOR A.3.20.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=5.5261	Y(1)=4.13
X(2)=5.3211	Y(2)=8.5
X(3)=5.0555	Y(3)=12.71
X(4)=4.925	Y(4)=15.97
X(5)=4.6594	Y(5)=19.4
X(6)=4.3895	Y(6)=23.59
X(7)=4.0537	Y(7)=26.52
X(8)=3.8766	Y(8)=27.8
X(9)=5.5913	Y(9)=4.18
X(10)=5.2325	Y(10)=10.11
X(11)=4.9437	Y(11)=15.04
X(12)=4.6594	Y(12)=20.09
X(13)=4.2867	Y(13)=24.41
X(14)=3.7928	Y(14)=27.87
X(15)=3.5924	Y(15)=28.54

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -195.853838$

C_1

$C_2 = 148.44075$

C_3

$C_4 = -30.7390299$

C_5

$C_6 = 1.89043736$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .998311824

ROTOR A.3.25.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=4.3147	Y(1)=1.46
X(2)=4.1887	Y(2)=4.9
X(3)=4.0439	Y(3)=8.05
X(4)=3.8198	Y(4)=11.23
X(5)=3.6937	Y(5)=13.19
X(6)=3.3995	Y(6)=17.9
X(7)=3.2874	Y(7)=19.56
X(8)=3.124	Y(8)=20.47
X(9)=2.9419	Y(9)=21.63
X(10)=4.2587	Y(10)=1.44
X(11)=4.0252	Y(11)=6.66
X(12)=3.8478	Y(12)=10.9
X(13)=3.5629	Y(13)=15.65
X(14)=3.3435	Y(14)=18.52
X(15)=3.1987	Y(15)=19.94
X(16)=2.9372	Y(16)=21.93

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -88.2661013$

C_1

$C_2 = 92.394005$

C_3

$C_4 = -23.1615974$

C_5

$C_6 = 1.51924864$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .994869734

ROTOR A.3.30.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=3.0999	Y(1)=1.55
X(2)=2.9955	Y(2)=4.15
X(3)=2.8609	Y(3)=7.06
X(4)=2.7426	Y(4)=8.36
X(5)=2.543	Y(5)=11.7
X(6)=2.4061	Y(6)=12.35
X(7)=2.0465	Y(7)=12.63
X(8)=3.0465	Y(8)=3.01
X(9)=2.9143	Y(9)=5.64
X(10)=2.7867	Y(10)=8.47
X(11)=2.6057	Y(11)=10.95
X(12)=2.4015	Y(12)=12.52

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -71.5213061$

C_1

$C_1 = 80.3249707$

C_2

$C_2 = -20.8284047$

C_3

$C_3 = .814896653$

C_4

COEF. DE CORRELACAO = .996565398

ROTOR A.3.10.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=7.123	Y(1)=5.49
X(2)=6.7471	Y(2)=11.01
X(3)=6.3712	Y(3)=17.32
X(4)=6.2237	Y(4)=19.08
X(5)=5.8906	Y(5)=22.74
X(6)=5.7383	Y(6)=26.92
X(7)=5.2245	Y(7)=31.06
X(8)=4.7486	Y(8)=35.2
X(9)=4.5774	Y(9)=35.98
X(10)=4.2681	Y(10)=36.27
X(11)=4.0587	Y(11)=36.85
X(12)=3.8494	Y(12)=37.54
X(13)=3.5924	Y(13)=37.24
X(14)=6.9136	Y(14)=8.65
X(15)=6.4854	Y(15)=15.01
X(16)=6	Y(16)=22.43
X(17)=5.4148	Y(17)=28.61
X(18)=4.3775	Y(18)=34.79
X(19)=4.0777	Y(19)=36.29
X(20)=3.7494	Y(20)=36.9

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -29.0799916$

$C_1 = 37.24587$

$C_2 = -5.97969412$

$C_3 = .199843402$

COEF. DE CORRELACAO = .99653882

ROTOR A.3.15.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=6.3664	Y(1)=8.29
X(2)=6.119	Y(2)=14.9
X(3)=5.8525	Y(3)=19.24
X(4)=5.38150001	Y(4)=23.53
X(5)=4.5726	Y(5)=31.36
X(6)=4.1682	Y(6)=35.18
X(7)=3.6448	Y(7)=35.62
X(8)=3.3593	Y(8)=35.31
X(9)=6.4521	Y(9)=8.48
X(10)=6.0429	Y(10)=15.59
X(11)=5.82870001	Y(11)=19.09
X(12)=5.2007	Y(12)=25.36
X(13)=4.5393	Y(13)=33.28
X(14)=3.9207	Y(14)=35.59
X(15)=3.3307	Y(15)=34.32
X(16)=2.9025	Y(16)=32.29

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -41.6300547$

$C_1 = 45.8700889$

$C_2 = -7.91589203$

$C_3 = .3112155$

COEF. DE CORRELACAO = .993207182

ROTOR A.3.20.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=5.2197	Y(1)=4.68
X(2)=4.9342	Y(2)=10.9
X(3)=4.4536	Y(3)=16.88
X(4)=4.2538	Y(4)=21.99
X(5)=3.8351	Y(5)=27.27
X(6)=3.506	Y(6)=28.9
X(7)=3.364	Y(7)=31.35
X(8)=2.6963	Y(8)=28.81
X(9)=5.1531	Y(9)=6.3
X(10)=4.9009	Y(10)=10.16
X(11)=4.5393	Y(11)=18.33
X(12)=3.8541	Y(12)=27.01
X(13)=3.3878	Y(13)=29.37
X(14)=3.1689	Y(14)=29.78
X(15)=3.1214	Y(15)=29.96
X(16)=2.8882	Y(16)=29.08

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -95.316163$

$C_1 = 91.8199218$

$C_2 = -20.4062285$

$C_3 = 1.24317816$

COEF. DE CORRELACAO = .993082006

ROTOR A.3.25.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=4.3299	Y(1)=5.21
X(2)=4.1111	Y(2)=10.94
X(3)=3.8874	Y(3)=14.88
X(4)=3.6495	Y(4)=18.43
X(5)=3.5401	Y(5)=20.15
X(6)=3.2784	Y(6)=22.44
X(7)=3.1261	Y(7)=23.96
X(8)=2.8359	Y(8)=25.84
X(9)=4.2823	Y(9)=6.01
X(10)=4.1253	Y(10)=10.38
X(11)=3.8446	Y(11)=14.59
X(12)=3.5639	Y(12)=19.88
X(13)=3.3593	Y(13)=22.58
X(14)=3.0928	Y(14)=24.19
X(15)=2.8882	Y(15)=25.54
X(16)=2.6741	Y(16)=25.56

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -11.8803396$
 $C_1 = 26.7229874$
 $C_2 = -3.85524586$
 $C_3 = -.323871485$

COEF. DE CORRELACAO = .996991183

ROTOR A.3.30.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE CIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=3.2926	Y(1)=2.11
X(2)=3.1285	Y(2)=6.19
X(3)=2.9834	Y(3)=10.15
X(4)=2.8026	Y(4)=13.28
X(5)=2.6955	Y(5)=14.47
X(6)=2.6099	Y(6)=15.39
X(7)=2.5099	Y(7)=16.57
X(8)=2.3505	Y(8)=17.45
X(9)=2.272	Y(9)=17.97
X(10)=3.2451	Y(10)=2.19
X(11)=3.1261	Y(11)=5.69
X(12)=2.9769	Y(12)=9.35
X(13)=2.8168	Y(13)=11.99
X(14)=2.6955	Y(14)=13.89
X(15)=2.5337	Y(15)=15.62
X(16)=2.3553	Y(16)=16.61

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 21.0195294$

$C_1 = -15.7113609$

$C_2 = 13.5994521$

$C_3 = -3.22924433$

COEF. DE CORRELACAO = .992157556

NÚMERO - ROTOR	C ₃	C ₂	C ₁	C ₀	FAIXA DE RV
A.3.10.1058	0,1029	- 3,6508	31,3995	- 63,6619	5,4 - 8,5
A.3.15.1058	0,0930	- 3,4784	27,9518	- 50,0517	4,6 - 7,5
A.3.20.1058	- 0,6129	5,9594	- 19,0873	28,6139	3,5 - 5,4
A.3.25.1058	- 2,3870	20,5633	- 60,9723	73,3768	2,7 - 4,3
A.3.30.1058	- 9,3728	67,2608	-165,3683	146,3302	2,3 - 3,1
A.3.10.1349	0,1852	- 4,7070	31,8861	- 43,3764	4,5 - 8,4
A.3.15.1349	- 0,3386	3,8771	- 15,6638	42,4797	4,2 - 7,2
A.3.20.1349	0,6860	- 12,1136	60,5236	- 78,6019	3,3 - 5,5
A.3.25.1349	- 0,2434	- 2,8991	23,7050	- 29,2165	2,5 - 4,2
A.3.30.1349	-28,2243	198,1550	-160,9714	364,7686	1,9 - 3,1
A.3.10.1639	0,0476	- 3,0243	21,7666	- 3,0686	4,1 - 7,7
A.3.15.1639	0,1085	- 4,7522	33,0656	- 29,2122	4,3 - 7,1
A.3.20.1639	1,8904	- 30,7390	148,4407	-195,8538	3,5 - 5,6
A.3.25.1639	1,5192	- 23,1616	92,3940	- 88,2661	2,9 - 4,3
A.3.30.1639	0,8148	- 20,8284	80,3250	- 71,5213	2,0 - 3,1
A.3.10.2031	0,1998	- 5,9796	37,2459	- 29,0799	3,5 - 7,2
A.3.15.2031	0,3112	- 7,9159	45,8700	- 41,6300	2,9 - 6,5
A.3.20.2031	1,2432	- 20,4062	91,8199	- 95,3161	2,8 - 5,2
A.3.25.2031	- 0,3238	- 3,8552	26,7230	- 11,8803	2,6 - 4,4
A.3.30.2031	- 3,2292	13,5994	- 15,7114	21,0195	2,2 - 3,3

TABELA A.VI.1 - Coeficientes dos polinômios de ajuste das curvas

C_p x RV

$$C_p = 0,01 \cdot (C_3 \cdot RV^3 + C_2 \cdot RV^2 + C_1 \cdot RV + C_0)$$

A.VI.2 - Dados e Coeficientes dos Polinômios de Ajuste da CurvaC_T x RV

ROTOR A.3.10.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=8.4527	Y(1)=.39
X(2)=8.1268	Y(2)=.72
X(3)=7.8105	Y(3)=1.03
X(4)=7.3571	Y(4)=1.47
X(5)=6.7432	Y(5)=2.05
X(6)=6.0349	Y(6)=2.63
X(7)=8.2827	Y(7)=.48
X(8)=7.9238	Y(8)=.88
X(9)=7.598	Y(9)=1.23
X(10)=7.1163	Y(10)=1.68
X(11)=6.3324	Y(11)=2.35
X(12)=5.4824	Y(12)=2.86

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -10.6184986$

$C_1 = 6.53096845$

$C_2 = -.970771043$

$C_3 = .0416334545$

COEF. DE CORRELACAO = .998932087

ROTOR A.3.15.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=7.4575	Y(1)=.47
X(2)=7.1851	Y(2)=.74
X(3)=6.9503	Y(3)=1.09
X(4)=6.6967	Y(4)=1.32
X(5)=6.3116	Y(5)=1.85
X(6)=5.997	Y(6)=2.07
X(7)=4.3345	Y(7)=3.13
X(8)=7.3354	Y(8)=.63
X(9)=7.0066	Y(9)=.96
X(10)=6.6967	Y(10)=1.28
X(11)=6.4196	Y(11)=1.66
X(12)=6.0111	Y(12)=2.09
X(13)=4.621	Y(13)=2.96

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -4.9476394$

$C_1 = 4.49426742$

$C_2 = -.752660159$

$C_3 = .0331364473$

COEF. DE CORRELACAO = .997344326

ROTOR A.3.20.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=5.4966	Y(1)=.38
X(2)=5.2859	Y(2)=.71
X(3)=5.1127	Y(3)=.9
X(4)=4.9535	Y(4)=1.15
X(5)=4.5415	Y(5)=1.6
X(6)=4.0405	Y(6)=2.03
X(7)=3.5021	Y(7)=2.44
X(8)=5.4451	Y(8)=.43
X(9)=5.2251	Y(9)=.78
X(10)=4.9816	Y(10)=1.15
X(11)=4.799	Y(11)=1.45
X(12)=3.9235	Y(12)=2.18

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 7.62535978$

$C_1 = -3.28575594$

$C_2 = .793319581$

$C_3 = -.0793607584$

COEF. DE CORRELACAO = .996711122

ROTOR A.3.25.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=4.2699	Y(1)=.49
X(2)=4.1318	Y(2)=1
X(3)=4.0241	Y(3)=1.36
X(4)=3.879	Y(4)=1.84
X(5)=3.6496	Y(5)=2.33
X(6)=3.3991	Y(6)=2.92
X(7)=3.0807	Y(7)=3.55
X(8)=2.76	Y(8)=4.18
X(9)=4.2699	Y(9)=.42
X(10)=4.2161	Y(10)=.81
X(11)=4.0756	Y(11)=1.17
X(12)=3.9071	Y(12)=1.68
X(13)=3.7151	Y(13)=2.23
X(14)=3.3476	Y(14)=3.06

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 23.893691$

$C_1 = -15.8927361$

$C_2 = 4.50886081$

$C_3 = -.484836555$

COEF. DE CORRELACAO = .998582446

ROTOR A.3.30.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=3.0199	Y(1)=.58
X(2)=2.9894	Y(2)=.97
X(3)=2.4955	Y(3)=2.65
X(4)=2.3293	Y(4)=3.28
X(5)=3.0643	Y(5)=.55
X(6)=2.5681	Y(6)=2.61
X(7)=2.3784	Y(7)=3.12

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 60.7890651$

C_1

$C_2 = -63.376227$

C_3

$C_4 = 24.0469764$

C_5

$C_6 = -3.19415222$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .994289715

ROTOR A.3.10.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=8.3526	Y(1)=.31
X(2)=7.9598	Y(2)=.74
X(3)=7.6191	Y(3)=1.13
X(4)=7.4109	Y(4)=1.35
X(5)=7.05120001	Y(5)=1.7
X(6)=6.8288	Y(6)=2.01
X(7)=6.4123	Y(7)=2.51
X(8)=5.906	Y(8)=3.27
X(9)=5.4469	Y(9)=3.77
X(10)=5.1583	Y(10)=4.15
X(11)=4.5809	Y(11)=4.71
X(12)=8.2769	Y(12)=.32
X(13)=7.9125	Y(13)=.7
X(14)=7.6806	Y(14)=1.08
X(15)=7.302	Y(15)=1.44
X(16)=6.9471	Y(16)=1.84
X(17)=6.5922	Y(17)=2.31
X(18)=5.5321	Y(18)=3.67
X(19)=4.9453	Y(19)=4.38

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 3.15012169$

$C_1 = 2.32196589$

$C_2 = -.567168261$

$C_3 = .0297419731$

COEF. DE CORRELACAO = .999109406

ROTOR A.3.15.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=7.0651	Y(1)=.89
X(2)=6.9229	Y(2)=1.11
X(3)=6.5767	Y(3)=1.69
X(4)=6.2401	Y(4)=2.08
X(5)=4.6563	Y(5)=4.11
X(6)=4.2343	Y(6)=4.72
X(7)=7.2074	Y(7)=.54
X(8)=7.0556	Y(8)=.85
X(9)=6.4914	Y(9)=1.6
X(10)=5.9176	Y(10)=2.43
X(11)=4.7512	Y(11)=4.12

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 15.089494$

$C_1 = -4.04951762$

$C_2 = .515500622$

$C_3 = -.0322397404$

COEF. DE CORRELACAO = .997807706

ROTOR A.3.20.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=5.4568	Y(1)=.43
X(2)=5.22570001	Y(2)=.88
X(3)=5.0889	Y(3)=1.2
X(4)=4.9238	Y(4)=1.48
X(5)=4.7776	Y(5)=1.88
X(6)=4.589	Y(6)=2.27
X(7)=4.4333	Y(7)=2.68
X(8)=4.1645	Y(8)=3.12
X(9)=3.8532	Y(9)=3.7
X(10)=5.5228	Y(10)=.33
X(11)=5.2775	Y(11)=.8
X(12)=5.1927	Y(12)=.99
X(13)=5.0747	Y(13)=1.31
X(14)=4.71160001	Y(14)=1.95
X(15)=4.3343	Y(15)=2.68
X(16)=3.8579	Y(16)=3.56
X(17)=3.3722	Y(17)=4.17

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -12.4292243$

0

$C_1 = 13.0100062$

1

$C_2 = -3.119748$

2

$C_3 = .214045671$

3

COEF. DE CORRELACAO = .998010824

ROTOR A.3.25.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=4.1754	Y(1)=.4
X(2)=4.0152	Y(2)=.73
X(3)=3.9398	Y(3)=1.17
X(4)=3.8267	Y(4)=1.48
X(5)=3.6759	Y(5)=1.77
X(6)=3.5581	Y(6)=2.07
X(7)=3.3931	Y(7)=2.35
X(8)=3.1198	Y(8)=2.79
X(9)=3.0444	Y(9)=3.25
X(10)=4.1377	Y(10)=.45
X(11)=4.034	Y(11)=.79
X(12)=3.9445	Y(12)=1.11
X(13)=3.822	Y(13)=1.4
X(14)=3.7654	Y(14)=1.68
X(15)=3.6052	Y(15)=2.01
X(16)=3.3931	Y(16)=2.44
X(17)=3.1198	Y(17)=2.93
X(18)=2.5354	Y(18)=3.24

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: C = -13.123872

0

C = 14.2883958

1

C = -3.7645427

2

C = .267362168

3

COEF. DE CORRELACAO = .990951395

ROTOR A.3.30.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=3.0088	Y(1)=.76
X(2)=2.978	Y(2)=1.86
X(3)=2.8101	Y(3)=2.74
X(4)=2.415	Y(4)=3.82
X(5)=2.1478	Y(5)=4.96
X(6)=3.0253	Y(6)=.52
X(7)=2.2873	Y(7)=4.04
X(8)=2.1525	Y(8)=4.4
X(9)=2.0342	Y(9)=4.74
X(10)=1.9538	Y(10)=4.97

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 103.551424$

$C_1 = -124.715537$

$C_2 = 52.7134328$

$C_3 = -7.50925746$

COEF. DE CORRELACAO = .970854952

ROTOR A.3.10.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=7.7113	Y(1)=.87
X(2)=7.1663	Y(2)=2.09
X(3)=6.7871	Y(3)=3.11
X(4)=6.2563	Y(4)=4.14
X(5)=5.4648	Y(5)=6.12
X(6)=4.1993	Y(6)=9.16
X(7)=6.8013	Y(7)=2.93
X(8)=5.8913	Y(8)=4.99
X(9)=5.0477	Y(9)=7.12

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 20.6626$

$C_1 = -3.004164$

$C_2 = .0721861952$

$C_3 = -1.97867904E-03$

COEF. DE CORRELACAO = .999426103

ROTOR A.3.15.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=7.0228	Y(1)=.95
X(2)=6.7032	Y(2)=1.73
X(3)=6.3929	Y(3)=2.74
X(4)=5.904	Y(4)=3.91
X(5)=5.3682	Y(5)=5.37
X(6)=4.6866	Y(6)=6.96
X(7)=7.1027	Y(7)=.66
X(8)=6.7925	Y(8)=1.37
X(9)=6.45400001	Y(9)=2.37
X(10)=6.078	Y(10)=3.29
X(11)=5.7489	Y(11)=4.11
X(12)=5.2883	Y(12)=5.42
X(13)=4.884	Y(13)=6.43
X(14)=4.3575	Y(14)=7.71

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 11.6709571$

$C_1 = 1.058583$

$C_2 = -.585158639$

$C_3 = .0307226022$

COEF. DE CORRELACAO = .998437529

ROTOR A.3.20.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=5.5261	Y(1)=.75
X(2)=5.3211	Y(2)=1.6
X(3)=5.0555	Y(3)=2.52
X(4)=4.925	Y(4)=3.24
X(5)=4.6594	Y(5)=4.16
X(6)=4.3895	Y(6)=5.38
X(7)=4.0537	Y(7)=6.54
X(8)=3.8766	Y(8)=7.17
X(9)=5.5913	Y(9)=.75
X(10)=5.2325	Y(10)=1.93
X(11)=4.9437	Y(11)=3.04
X(12)=4.6594	Y(12)=4.31
X(13)=4.2867	Y(13)=5.69
X(14)=3.7928	Y(14)=7.35
X(15)=3.5924	Y(15)=7.95

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -24.4328775$

$C_1 = 26.0433599$

$C_2 = -6.33703848$

$C_3 = .443823395$

COEF. DE CORRELACAO = .999240763

ROTOR A.3.25.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=4.3147	Y(1)=.34
X(2)=4.1887	Y(2)=1.17
X(3)=4.0439	Y(3)=1.99
X(4)=3.8198	Y(4)=2.94
X(5)=3.6937	Y(5)=3.57
X(6)=3.3995	Y(6)=5.27
X(7)=3.2874	Y(7)=5.95
X(8)=3.124	Y(8)=6.55
X(9)=2.9419	Y(9)=7.35
X(10)=4.2587	Y(10)=.34
X(11)=4.0252	Y(11)=1.65
X(12)=3.8478	Y(12)=2.83
X(13)=3.5629	Y(13)=4.39
X(14)=3.3435	Y(14)=5.54
X(15)=3.1987	Y(15)=6.24
X(16)=2.9372	Y(16)=7.47

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -9.51241773$

$C_1 = 20.6729409$

$C_2 = -6.80525467$

$C_3 = .588853605$

COEF. DE CORRELACAO = .997270227

ROTOR A.3.30.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=3.0999	Y(1)=.5
X(2)=2.9955	Y(2)=1.38
X(3)=2.8609	Y(3)=2.47
X(4)=2.7426	Y(4)=3.05
X(5)=2.543	Y(5)=4.6
X(6)=2.4061	Y(6)=5.13
X(7)=2.0465	Y(7)=6.17
X(8)=3.0465	Y(8)=.99
X(9)=2.9143	Y(9)=1.94
X(10)=2.7867	Y(10)=3.04
X(11)=2.6057	Y(11)=4.2
X(12)=2.4015	Y(12)=5.21

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -31.178416$

$C_1 = 43.8003966$

$C_2 = -15.7017327$

$C_3 = 1.57126153$

COEF. DE CORRELACAO = .997913588

ROTOR A.3.10.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=7.123	Y(1)=.77
X(2)=6.7471	Y(2)=1.63
X(3)=6.3712	Y(3)=2.72
X(4)=6.2237	Y(4)=3.07
X(5)=5.8906	Y(5)=3.86
X(6)=5.7383	Y(6)=4.69
X(7)=5.2245	Y(7)=5.94
X(8)=4.7486	Y(8)=7.41
X(9)=4.5774	Y(9)=7.86
X(10)=4.2681	Y(10)=8.5
X(11)=4.0587	Y(11)=9.08
X(12)=3.8494	Y(12)=9.75
X(13)=3.5924	Y(13)=10.37
X(14)=6.9136	Y(14)=1.25
X(15)=6.4854	Y(15)=2.32
X(16)=6	Y(16)=3.74
X(17)=5.4148	Y(17)=5.28
X(18)=4.3775	Y(18)=7.95
X(19)=4.0777	Y(19)=8.9
X(20)=3.7494	Y(20)=9.84

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 15.585073$

$C_1 = -.0616047889$

$C_2 = -.504125226$

$C_3 = .0308149986$

COEF. DE CORRELACAO = .998475704

ROTOR A.3.15.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=6.3664	Y(1)=1.3
X(2)=6.119	Y(2)=2.44
X(3)=5.8525	Y(3)=3.29
X(4)=5.38150001	Y(4)=4.37
X(5)=4.5726	Y(5)=6.86
X(6)=4.1682	Y(6)=8.44
X(7)=3.6448	Y(7)=9.77
X(8)=3.3593	Y(8)=10.51
X(9)=6.4521	Y(9)=1.31
X(10)=6.0429	Y(10)=2.58
X(11)=5.82870001	Y(11)=3.28
X(12)=5.2007	Y(12)=4.88
X(13)=4.5393	Y(13)=7.33
X(14)=3.9207	Y(14)=9.08
X(15)=3.3307	Y(15)=10.45
X(16)=2.9025	Y(16)=11.12

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 5.90383326$

$C_1 = 6.12159443$

$C_2 = -1.82193569$

$C_3 = .118365968$

COEF. DE CORRELACAO = .997894953

ROTOR A.3.20.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=5.2197	Y(1)=.9
X(2)=4.9342	Y(2)=2.21
X(3)=4.4536	Y(3)=3.79
X(4)=4.2538	Y(4)=5.17
X(5)=3.8351	Y(5)=7.11
X(6)=3.506	Y(6)=8.24
X(7)=3.364	Y(7)=9.32
X(8)=2.6963	Y(8)=10.68
X(9)=5.1531	Y(9)=1.22
X(10)=4.9009	Y(10)=2.07
X(11)=4.5393	Y(11)=4.04
X(12)=3.8541	Y(12)=7.01
X(13)=3.3878	Y(13)=8.67
X(14)=3.1689	Y(14)=9.4
X(15)=3.1214	Y(15)=9.6
X(16)=2.8882	Y(16)=10.07

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -9.33653078$

$C_1 = 19.1229547$

$C_2 = -5.50075604$

$C_3 = .424203935$

COEF. DE CORRELACAO = .99681507

ROTOR A.3.25.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=4.3299	Y(1)=1.2
X(2)=4.1111	Y(2)=2.66
X(3)=3.8874	Y(3)=3.83
X(4)=3.6495	Y(4)=5.05
X(5)=3.5401	Y(5)=5.69
X(6)=3.2784	Y(6)=6.85
X(7)=3.1261	Y(7)=7.66
X(8)=2.8359	Y(8)=9.11
X(9)=4.2823	Y(9)=1.4
X(10)=4.1253	Y(10)=2.52
X(11)=3.8446	Y(11)=3.79
X(12)=3.5639	Y(12)=5.58
X(13)=3.3593	Y(13)=6.72
X(14)=3.0928	Y(14)=7.82
X(15)=2.8882	Y(15)=8.84
X(16)=2.6741	Y(16)=9.56

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 11.3375371$

$C_1 = 3.47344878$

$C_2 = -1.84723614$

$C_3 = .116696854$

COEF. DE CORRELACAO = .998492382

ROTOR A.3.30.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE TORQUE

X(1)=3.2926	Y(1)=.64
X(2)=3.1285	Y(2)=1.98
X(3)=2.9834	Y(3)=3.4
X(4)=2.8026	Y(4)=4.74
X(5)=2.6955	Y(5)=5.37
X(6)=2.6099	Y(6)=5.9
X(7)=2.5099	Y(7)=6.6
X(8)=2.3505	Y(8)=7.42
X(9)=2.272	Y(9)=7.91
X(10)=3.2451	Y(10)=.67
X(11)=3.1261	Y(11)=1.82
X(12)=2.9769	Y(12)=3.14
X(13)=2.8168	Y(13)=4.26
X(14)=2.6955	Y(14)=5.15
X(15)=2.5337	Y(15)=6.16
X(16)=2.3553	Y(16)=7.05

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 19.8259577$

$C_1 = -8.44301869$

$C_2 = 2.73150113$

$C_3 = -.594186788$

COEF. DE CORRELACAO = .994944272

NÚMERO - ROTOR	C_3	C_2	C_1	C_0	FAIXA DE RV
A.3.10.1058	0,0416	- 0,9708	6,5310	- 10,6185	5,4 - 8,5
A.3.15.1058	0,0331	- 0,7527	4,4943	- 4,9476	4,6 - 7,5
A.3.20.1058	- 0,0794	0,7933	- 3,2857	7,6524	3,5 - 5,4
A.3.25.1058	- 0,4848	4,5089	- 15,8927	23,8937	2,7 - 4,3
A.3.30.1058	- 3,1941	24,0470	- 63,3762	60,7890	2,3 - 3,1
A.3.10.1349	0,0297	- 0,5671	2,3219	3,1501	4,5 - 8,4
A.3.15.1349	- 0,0322	0,5155	- 4,0495	15,0895	4,2 - 7,2
A.3.20.1349	0,2140	- 3,1197	13,0100	- 12,4292	3,3 - 5,5
A.3.25.1349	0,2674	- 3,7645	14,2884	- 13,1239	2,5 - 4,2
A.3.30.1349	- 7,5093	52,7134	-124,7155	103,5514	1,9 - 3,1
A.3.10.1639	$-1,98 \times 10^{-3}$	0,0722	- 3,0042	20,6626	4,1 - 7,7
A.3.15.1639	0,0307	- 0,5852	1,0586	11,6709	4,3 - 7,1
A.3.20.1639	0,4438	- 6,3370	26,0434	- 24,4329	3,5 - 5,6
A.3.25.1639	0,5888	- 6,8052	20,6729	- 9,5124	2,9 - 4,3
A.3.30.1639	1,5713	- 15,7017	43,8004	- 31,1784	2,0 - 3,1
A.3.10.2031	0,0308	- 0,5041	- 0,0616	15,5850	3,5 - 7,2
A.3.15.2031	0,1184	- 1,8219	6,1216	5,9038	2,9 - 6,5
A.3.20.2031	0,4242	- 5,5007	19,1229	- 9,3365	2,8 - 5,2
A.3.25.2031	0,1167	- 1,8472	3,4734	11,3375	2,6 - 4,4
A.3.30.2031	- 0,5942	2,7315	- 8,4430	19,8259	2,2 - 3,3

TABELA A.VI.2 - Coeficientes dos polinômios de ajuste das curvas

 $C_T \times RV$

$$C_T = 0,01 \cdot (C_3.RV^3 + C_2.RV^2 + C_1.RV + C_0)$$

A.VI.3 - Dados e Coeficientes dos Polinomios de Ajuste da CurvaC_E x RV

ROTOR A.3.10.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=8.4527	Y(1)=95.11
X(2)=8.1268	Y(2)=96.38
X(3)=7.8105	Y(3)=96.71
X(4)=7.3571	Y(4)=96.23
X(5)=6.7432	Y(5)=91.17
X(6)=6.0349	Y(6)=87.86
X(7)=8.2827	Y(7)=96.11
X(8)=7.9238	Y(8)=95.34
X(9)=7.598	Y(9)=95.4
X(10)=7.1163	Y(10)=90.82
X(11)=6.3324	Y(11)=86.3
X(12)=5.4824	Y(12)=89.17

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 846.91781$

$C_1 = -337.782038$

$C_2 = 49.2622663$

$C_3 = -2.34548411$

COEF. DE CORRELACAO = .915801829

ROTOR A.3.15.1058
 EQUIPAMNETO DE MEDIAD= TORQUIMETRO LMF-A2
 COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE
 COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=7.4575	Y(1)=62.8
X(2)=7.1851	Y(2)=59.46
X(3)=6.9503	Y(3)=66.3
X(4)=6.6967	Y(4)=65.4
X(5)=6.3116	Y(5)=68.59
X(6)=5.997	Y(6)=62.95
X(7)=7.3354	Y(7)=64.77
X(8)=7.0066	Y(8)=67.94
X(9)=6.6967	Y(9)=66.03
X(10)=6.4196	Y(10)=65.74
X(11)=6.0111	Y(11)=61.55
X(12)=4.621	Y(12)=58.87

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 524.685522$
 $C_1 = -251.500623$
 $C_2 = 44.3455914$
 $C_3 = -2.54034807$

COEF. DE CORRELACAO = .511401691

ROTOR A.3.20.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=5.4966	Y(1)=33.73
X(2)=5.2859	Y(2)=34.49
X(3)=5.1127	Y(3)=34.32
X(4)=4.9535	Y(4)=34.62
X(5)=4.5415	Y(5)=36.45
X(6)=4.0405	Y(6)=39.62
X(7)=3.5021	Y(7)=40.44
X(8)=5.4451	Y(8)=33.02
X(9)=5.2251	Y(9)=34.95
X(10)=4.9816	Y(10)=35.74
X(11)=4.799	Y(11)=38.61
X(12)=3.9235	Y(12)=40.49

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -54.0156277$

C_1

$C_2 = 66.2792952$

C_3

$C_4 = -14.8170324$

C_5

$C_6 = 1.02836638$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .891036612

ROTOR A.3.25.1058

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=4.2699	Y(1)=19.26
X(2)=4.1318	Y(2)=19.31
X(3)=4.0241	Y(3)=20.31
X(4)=3.879	Y(4)=21.97
X(5)=3.6496	Y(5)=23.62
X(6)=3.3991	Y(6)=26.34
X(7)=3.0807	Y(7)=27.55
X(8)=2.76	Y(8)=27.81
X(9)=4.2699	Y(9)=19.17
X(10)=4.2161	Y(10)=20.76
X(11)=4.0756	Y(11)=20.64
X(12)=3.9071	Y(12)=21.24
X(13)=3.7151	Y(13)=24.02
X(14)=3.3476	Y(14)=26

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -199.0547$

C_1

$C_2 = 199.173408$

C_3

$C_4 = -56.5262669$

C_5

$C_6 = 5.12025312$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .974569114

ROTOR A.3.30.1058
 EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2
 COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE
 COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=3.0199	Y(1)=13.08
X(2)=2.9894	Y(2)=13.54
X(3)=2.4955	Y(3)=18.81
X(4)=2.3293	Y(4)=20.14
X(5)=3.0643	Y(5)=13.03
X(6)=2.5681	Y(6)=18.77
X(7)=2.3784	Y(7)=20.57

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -415.174493$
 $C_1 = 502.248414$
 $C_2 = -189.367518$
 $C_3 = 23.1895162$

COEF. DE CORRELACAO = .992562881

ROTOR A.3.10.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=8.3526	Y(1)=101.84
X(2)=7.9598	Y(2)=104
X(3)=7.6191	Y(3)=102.98
X(4)=7.4109	Y(4)=102.51
X(5)=7.05120001	Y(5)=101.85
X(6)=6.8288	Y(6)=98.5
X(7)=6.4123	Y(7)=97.9
X(8)=5.906	Y(8)=102.83
X(9)=5.4469	Y(9)=95.89
X(10)=5.1583	Y(10)=97.96
X(11)=4.5809	Y(11)=95.94
X(12)=8.2769	Y(12)=101.21
X(13)=7.9125	Y(13)=100.88
X(14)=7.6806	Y(14)=100.45
X(15)=7.302	Y(15)=97.67
X(16)=6.9471	Y(16)=97.52
X(17)=6.5922	Y(17)=97.35
X(18)=5.5321	Y(18)=97.75
X(19)=4.9453	Y(19)=97.8

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 68.5885718$

$C_1 = 12.5294781$

$C_2 = -1.87824146$

$C_3 = .103531791$

COEF. DE CORRELACAO = .467793519

ROTOR A.3.15.1349
 EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2
 COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE
 COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=5.4568	Y(1)=36.13
X(2)=5.22570001	Y(2)=39.88
X(3)=5.0889	Y(3)=40.58
X(4)=4.9238	Y(4)=41.57
X(5)=4.7776	Y(5)=44.02
X(6)=4.589	Y(6)=45.43
X(7)=4.4333	Y(7)=46.55
X(8)=4.1645	Y(8)=47.7
X(9)=3.8532	Y(9)=49.35
X(10)=5.5228	Y(10)=37.49
X(11)=5.2775	Y(11)=41.5
X(12)=5.1927	Y(12)=41.37
X(13)=5.0747	Y(13)=41.73
X(14)=4.71160001	Y(14)=43.11
X(15)=4.3343	Y(15)=45.6
X(16)=3.8579	Y(16)=48.87

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 192.522045$
 $C_1 = -90.0604242$
 $C_2 = 19.518296$
 $C_3 = -1.50479079$

COEF. DE CORRELACAO = .94695023

ROTOR A.3.20.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=7.0651	Y(1)=60.63
X(2)=6.9229	Y(2)=61.33
X(3)=6.5767	Y(3)=69.76
X(4)=6.2401	Y(4)=65.88
X(5)=4.6563	Y(5)=70.22
X(6)=4.2343	Y(6)=71.53
X(7)=7.2074	Y(7)=59.57
X(8)=7.0556	Y(8)=61.09
X(9)=6.4914	Y(9)=61.81
X(10)=5.9176	Y(10)=68.33
X(11)=4.7512	Y(11)=69.55

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 222.630128$

C_1

$C_1 = -84.2353978$

C_2

$C_2 = 15.6308812$

C_3

$C_3 = -.9834444$

C_3

COEF. DE CORRELACAO = .816667706

ROTOR A.3.25.1349

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=4.1754	Y(1)=17.63
X(2)=4.0152	Y(2)=19.24
X(3)=3.9398	Y(3)=22.01
X(4)=3.8267	Y(4)=23.96
X(5)=3.6759	Y(5)=25.32
X(6)=3.5581	Y(6)=27.13
X(7)=3.3931	Y(7)=27.95
X(8)=3.1198	Y(8)=29.39
X(9)=3.0444	Y(9)=30.84
X(10)=4.1377	Y(10)=20.03
X(11)=4.034	Y(11)=21.55
X(12)=3.9445	Y(12)=24.04
X(13)=3.822	Y(13)=25.38
X(14)=3.7654	Y(14)=24.71
X(15)=3.6052	Y(15)=25.6
X(16)=3.3931	Y(16)=28.04
X(17)=3.1198	Y(17)=30.92
X(18)=2.5354	Y(18)=31.73

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: C = 56.5893452

0

C = -28.1260496

1

C = 11.4155432

2

C = -1.6444773

3

COEF. DE CORRELACAO = .953604751

ROTOR A.3.30.1349

EQUIFAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=7.7113	Y(1)=97.45
X(2)=7.1663	Y(2)=98.39
X(3)=6.7871	Y(3)=99.57
X(4)=6.2563	Y(4)=100.37
X(5)=5.4648	Y(5)=106.04
X(6)=4.1993	Y(6)=104.66
X(7)=6.8013	Y(7)=98.74
X(8)=5.8913	Y(8)=103.72
X(9)=5.0477	Y(9)=105.35

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -77.035592$

C_1

$C_1 = 96.4603128$

C_2

$C_2 = -16.3768902$

C_3

$C_3 = .882440136$

C_4

COEF. DE CORRELACAO = .959300953

ROTOR A.3.10.1639

EQUIFAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE POTENCIA

X(1)=7.7113	Y(1)=97.45
X(2)=7.1663	Y(2)=98.39
X(3)=6.7871	Y(3)=99.57
X(4)=6.2563	Y(4)=100.37
X(5)=5.4648	Y(5)=106.04
X(6)=4.1993	Y(6)=104.66
X(7)=6.8013	Y(7)=98.74
X(8)=5.8913	Y(8)=103.72
X(9)=5.0477	Y(9)=105.35

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -77.035592$

0

$C_1 = 96.4603128$

1

$C_2 = -16.3768902$

2

$C_3 = .882440136$

3

COEF. DE CORRELACAO = .959300953

ROTOR A.3.15.1639
 EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2
 COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE
 COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=7.0228	Y(1)=61.74
X(2)=6.7032	Y(2)=62.95
X(3)=6.3929	Y(3)=64.95
X(4)=5.904	Y(4)=70.29
X(5)=5.3682	Y(5)=82.18
X(6)=4.6866	Y(6)=78.49
X(7)=7.1027	Y(7)=59.83
X(8)=6.7925	Y(8)=61.51
X(9)=6.45400001	Y(9)=60.95
X(10)=6.078	Y(10)=65.64
X(11)=5.7489	Y(11)=.96
X(12)=5.2883	Y(12)=74.99
X(13)=4.884	Y(13)=80.5
X(14)=4.3575	Y(14)=82.68

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 121.087714$
 $C_1 = 38.780408$
 $C_2 = -17.2228493$
 $C_3 = 1.49945525$

COEF. DE CORRELACAO = .206617821

ROTOR A.3.20.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=5.5261	Y(1)=31.21
X(2)=5.3211	Y(2)=40.25
X(3)=5.0555	Y(3)=50.29
X(4)=4.925	Y(4)=45
X(5)=4.6594	Y(5)=48.03
X(6)=4.3895	Y(6)=52.64
X(7)=4.0537	Y(7)=57.15
X(8)=3.8766	Y(8)=55.47
X(9)=5.5913	Y(9)=34.2
X(10)=5.2325	Y(10)=37.99
X(11)=4.9437	Y(11)=43.26
X(12)=4.6594	Y(12)=46.74
X(13)=4.2867	Y(13)=55.82
X(14)=3.7928	Y(14)=59.83
X(15)=3.5924	Y(15)=60.84

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 239.79255$

C_1

$C_2 = -115.556092$

C_3

$C_4 = 25.9854748$

C_5

$C_6 = -2.13707268$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .924021105

ROTOR A.3.25.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=4.3147	Y(1)=20.59
X(2)=4.1887	Y(2)=24.52
X(3)=4.0439	Y(3)=26.36
X(4)=3.8198	Y(4)=29.71
X(5)=3.6937	Y(5)=30.46
X(6)=3.3995	Y(6)=36.32
X(7)=3.2874	Y(7)=38.83
X(8)=3.124	Y(8)=41.92
X(9)=2.9419	Y(9)=43.6
X(10)=4.2587	Y(10)=21.09
X(11)=4.0252	Y(11)=25.1
X(12)=3.8478	Y(12)=29.12
X(13)=3.5629	Y(13)=33.97
X(14)=3.3435	Y(14)=37.82
X(15)=3.1987	Y(15)=40.33
X(16)=2.9372	Y(16)=44.85

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 72.1968287$

$C_1 = 1.30397941$

$C_2 = -4.93788899$

$C_3 = .436155699$

COEF. DE CORRELACAO = .992844581

ROTOR A.3.30.1639

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=3.0999	Y(1)=15.15
X(2)=2.9955	Y(2)=17.49
X(3)=2.8609	Y(3)=20.42
X(4)=2.7426	Y(4)=22.18
X(5)=2.543	Y(5)=28.12
X(6)=2.4061	Y(6)=30.29
X(7)=2.0465	Y(7)=32.22
X(8)=3.0465	Y(8)=15.82
X(9)=2.9143	Y(9)=18.73
X(10)=2.7867	Y(10)=21.7
X(11)=2.6057	Y(11)=25.19
X(12)=2.4015	Y(12)=28.45

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -254.74879$

$C_1 = 343.425865$

$C_2 = -131.533188$

$C_3 = 15.7523028$

COEF. DE CORRELACAO = .989010424

ROTOR A.3.10.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=7.123	Y(1)=98.68
X(2)=6.7471	Y(2)=98.24
X(3)=6.3712	Y(3)=101.35
X(4)=6.2237	Y(4)=102.28
X(5)=5.8906	Y(5)=99.57
X(6)=5.7383	Y(6)=104.38
X(7)=5.2245	Y(7)=104.65
X(8)=4.7486	Y(8)=108.29
X(9)=4.5774	Y(9)=107.85
X(10)=4.2681	Y(10)=104.47
X(11)=4.0587	Y(11)=103.84
X(12)=3.8494	Y(12)=103.44
X(13)=3.5924	Y(13)=101

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -95.1897551$

C_1

$C_2 = 110.712535$

C_3

$C_4 = -19.6503781$

C_5

$C_6 = 1.11275964$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .814233541

ROTOR A.3.15.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=6.3664	Y(1)=67.81
X(2)=6.119	Y(2)=75.19
X(3)=5.8525	Y(3)=76.17
X(4)=5.38150001	Y(4)=77.68
X(5)=4.5726	Y(5)=83.73
X(6)=4.1682	Y(6)=87.38
X(7)=3.6448	Y(7)=85.78
X(8)=3.3593	Y(8)=87.65

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 105.30093$

$C_1 = -13.129665$

$C_2 = 3.59814144$

$C_3 = -.379866063$

COEF. DE CORRELACAO = .947995803

ROTOR A.3.20.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=5.2197	Y(1)=40.13
X(2)=4.9342	Y(2)=44.05
X(3)=4.4536	Y(3)=48.59
X(4)=4.2538	Y(4)=51.34
X(5)=3.8351	Y(5)=59.53
X(6)=3.506	Y(6)=63.18
X(7)=3.364	Y(7)=67
X(8)=2.6963	Y(8)=70.12

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -87.7484383$

C_1

$C_1 = 139.422804$

C_2

$C_2 = -38.5010189$

C_3

$C_3 = 3.1625837$

C_4

COEF. DE CORRELACAO = .994233978

ROTOR A.3.25.2031
 EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2
 COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE
 COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=4.3299	Y(1)=24.47
X(2)=4.1111	Y(2)=29.63
X(3)=3.8874	Y(3)=33.28
X(4)=3.6495	Y(4)=37.02
X(5)=3.5401	Y(5)=39.15
X(6)=3.2784	Y(6)=42
X(7)=3.1261	Y(7)=44.94
X(8)=2.8359	Y(8)=48.67

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = 195.156584$
 $C_1 = -112.357708$
 $C_2 = 30.0801936$
 $C_3 = -3.05533506$

COEF. DE CORRELACAO = .998567163

ROTOR A.3.30.2031

EQUIPAMENTO DE MEDIDA= TORQUIMETRO LMF-A2

COORDENADA X= RAZAO DE VELOCIDADE

COORDENADA Y= COEFICIENTE DE EMPUXO

X(1)=3.2926	Y(1)=26.34
X(2)=3.1285	Y(2)=21.53
X(3)=2.9834	Y(3)=24.29
X(4)=2.8026	Y(4)=27.59
X(5)=2.6955	Y(5)=30.43
X(6)=2.6099	Y(6)=31.68
X(7)=2.5099	Y(7)=33.19
X(8)=2.3505	Y(8)=34.97

AJUSTE POLINOMIAL

POLINOMIO DE GRAU 3 DE MELHOR AJUSTE:

$$Y = C_0 + C_1 * X + C_2 * X^2 + C_3 * X^3$$

onde: $C_0 = -1324.53675$

C_1

$C_2 = 1529.78935$

C_3

$C_4 = -566.457866$

C_5

$C_6 = 68.7635548$

C_7

COEF. DE CORRELACAO = .979744385

NÚMERO-ROTOR	C ₃	C ₂	C ₁	C ₀	FAIXA DE RV
A.3.10.1058	- 2,34	49,26	- 337,78	846,91	5,4 - 8,5
A.3.15.1058	- 2,54	44,34	- 251,50	524,68	4,6 - 7,5
A.3.20.1058	1,03	- 14,82	66,28	- 54,01	3,5 - 5,4
A.3.25.1058	5,12	- 56,53	199,17	- 199,05	2,7 - 4,3
A.3.30.1058	23,19	-189,37	502,25	- 415,18	2,3 - 3,1
A.3.10.1349	0,10	- 1,87	12,53	68,58	4,5 - 8,4
A.3.15.1349	- 1,51	19,52	- 90,06	192,52	4,2 - 7,2
A.3.20.1439	- 0,98	15,63	- 84,24	222,63	3,3 - 5,5
A.3.25.1349	- 1,64	11,41	- 28,13	56,59	2,5 - 4,2
A.3.30.1349	0,88	- 16,37	96,46	- 77,03	1,9 - 3,1
A.3.10.1639	0,88	- 16,37	96,46	- 77,03	4,1 - 7,7
A.3.15.1639	1,49	- 17,22	38,78	121,08	4,3 - 7,1
A.3.20.1639	- 2,13	25,98	- 115,56	239,79	3,5 - 5,6
A.3.25.1639	0,44	- 4,94	1,30	72,19	2,9 - 4,3
A.3.30.1639	15,75	-131,53	343,42	- 254,75	2,0 - 3,1
A.3.10.2031	1,11	- 19,65	110,71	- 95,19	3,5 - 7,2
A.3.15.2031	- 0,38	3,59	- 13,13	105,30	2,9 - 6,5
A.3.20.2031	3,16	- 38,50	139,42	- 87,75	2,8 - 5,2
A.3.25.2031	- 3,05	30,08	- 112,35	195,15	2,6 - 4,4
A.3.30.2031	68,76	-566,45	1529,79	-1324,53	2,2 - 3,3

TABELA A.VI.3 - Coeficientes dos polinômios de ajuste das curvas

 $C_E \times RV$

$$C_E = 0,01 \cdot (C_3 \cdot RV^3 + C_2 \cdot RV^2 + C_1 \cdot RV + C_0)$$

A.VI.4 - Curvas de C_p x RV, C_T x RV e C_E x RV da Família A

